



Efectis France
Espace Technologique
Bâtiment Apollo
Route de l'Orme des Merisiers
F-91193 Saint-Aubin
Tél : 33 (0)1 60 13 83 80

RAPPORT D'ÉTUDE

Référence : 20-001126-NDB
Affaire : 19-005227-BO

ÉTUDE D'INGENIERIE DE SECURITE INCENDIE APPLIQUEE A UN PARC DE STATIONNEMENT SILO EN STRUCTURE BOIS A BORDEAUX (33)

RAPPORT D'ÉTUDE

Client demandeur ICADE

Référence et date de commande Bon pour commande 19-002662-MDU du 16/12/2019

Projet Parking Silo Bois Bordeaux - Ilot 8.12 - Quartier Armagnac

Date : 22 Juin 2020
Indice de révision : A
Nombre de pages : 45

Auteur(s) :
Nicolas de BRYE

SUIVI DES MODIFICATIONS

Indice de révision	Date	Modifications
A	22/06/2020	Version initiale

Ce document annule et remplace toutes les versions précédentes

SOMMAIRE

1. Introduction	5
2. Documents de référence	6
2.1. Documents fournis par le client	6
2.2. Textes réglementaires	6
2.3. Normes et standards	6
2.4. Documents techniques	6
3. Description de l'ouvrage	8
3.1. Caractéristiques géométriques du parc de stationnement	8
3.2. Installation fixe d'extinction automatique à eau	12
4. Méthodologie	14
4.1. Phase 1 : Définition des objectifs, des critères de performance et des scénarios d'incendie réel	14
4.2. Phase 2 : Modélisation du développement du feu	14
4.3. Phase 3 : Analyse et conclusions	15
5. Proposition de scénario	16
5.1. Scénarios de feu libre de véhicules	16
5.1.1. Débit calorifique et développement de feu pour le feu de véhicules	16
5.1.2. Localisation des foyers	19
5.2. Prise en compte de la contribution des éléments en bois	19
5.3. Prise en compte du vent	20
5.4. Prise en compte des effets de l'eau sur le développement du feu	21
5.5. Synthèse des scénarios	22
6. Modélisation et hypothèses de calcul	23
6.1. Outils de modélisation	23
6.2. Géométrie du parc de stationnement	23
6.3. Combustibles	25
6.4. Matériaux	25
7. Résultats et analyses	26
7.1. Scénario 1	26
7.1.1. Débit calorifique	26
7.1.2. Sollicitations thermiques sur le bois	27
7.1.3. Combustion du bois	29
7.1.4. Intervention des services de secours	29
7.2. Scénario 2	31
7.2.1. Débit calorifique	31
7.2.2. Sollicitations thermiques sur le bois	32
7.2.3. Combustion du bois	34
7.3. Scénario 3	34
7.3.1. Temps d'activation des sprinklers	34
7.3.2. Débit calorifique	34
7.3.3. Sollicitations thermiques sur le bois	35
7.3.4. Combustion du bois	36
7.4. Synthèse des résultats	38
8. Conclusions	39

ANNEXE A : Champs de Vitesse.....	40
A.1 Scénario 1	40
A.2 Scénario 2	43

1. INTRODUCTION

Cette étude s'inscrit dans le cadre du projet de construction d'un parking silo situé à Bordeaux (33) constitué d'une structure porteuse en bois (avec dalle en béton). D'un point de vue structural, les prescriptions réglementaires seront respectées de façon à assurer une stabilité au feu de 1h30. Le parking est ouvert sur au moins deux façades et répond aux critères permettant de le classer comme un parc de stationnement largement ventilé (PSLV) au sens de l'arrêté du 9 Mai 2006 pour tous les niveaux excepté le RDC. Ce dernier sera désenfumé par ventilation naturelle traversante par des grilles en vis-à-vis.

Suite à une présentation du projet, le SDIS 33 demande, en complément à une requête initiale de sprinklage du parc de stationnement, qu'une étude d'ingénierie de sécurité incendie (ISI) soit réalisée afin de montrer que le dimensionnement de la structure permet d'assurer une stabilité au feu de 1h30 sous incendie réel (avec et sans vent) sans prise en compte des effets du système automatique d'extinction.

L'étude a donc pour but de démontrer que malgré la masse combustible mobilisable de la structure bois présente,

- d'une part le feu de véhicules ne mène pas à un auto-entretien de la combustion du bois après extinction du foyer primaire,
- et d'autre part que la contribution du bois reste acceptable pour la tenue des structures sur la durée prescrite demandée. En complément, les services de secours souhaitent également connaître les délais de ruine de l'ouvrage au-delà des 90 minutes.

Pour ce faire, des modélisations et simulations numériques du développement de feux de véhicules dans le parking vont être menées pour s'assurer du premier point. Les actions thermiques et les vitesses de carbonisation déterminées par les simulations seront transmises au bureau d'étude du projet qui pourra déterminer les nouvelles sections critiques des éléments de structures bois pour obtenir une stabilité de 90 minute sous feux réels. L'analyse consistera alors à s'assurer que cette section critique est comparable ou inférieure à celle initialement calculée.

À titre informatif un scénario avec contrôle de l'incendie sera aussi étudié pour apprécier le gain apporté par le sprinkler.

Ce document rappelle la méthodologie et les hypothèses qui seront prises en compte et présente les résultats des simulations numériques incendie. Il devra être soumis aux autorités locales compétentes pour avis.

2. DOCUMENTS DE REFERENCE

2.1. DOCUMENTS FOURNIS PAR LE CLIENT

- [1] Mail du 17 janvier 2020 de Grégoire STOUCK, Société COSA
PC40-d Façades (dossier).pdf
PC40-e Plans de niveaux.pdf
PC 40 - NOTICE DE SECURITE - PARKING - v.pdf
A40-a Calcul des 50% d'ouverture de la façade du parking.pdf
- [2] Mail de David BRUCHON (ICADE) du 27/01/2020
- [3] 200616-EPABE ILOT 8.12-SC-PRO-PKG-01 - STABILITE AU FEU : Note d'hypothèse stabilité au feu, SYLVA Conseil, le 16/06/2020

2.2. TEXTES REGLEMENTAIRES

- [4] Arrêté du 9 mai 2006 portant approbation de dispositions complétant et modifiant le règlement de sécurité contre les risques d'incendie et de panique dans les établissements recevant du public (parcs de stationnement couverts)
- [5] Arrêté du 22 mars 2004 relatif à la résistance au feu des produits, éléments de construction et d'ouvrages (modifié le 14/03/2011)
- [6] Avis modifiant l'avis relatif à la reconnaissance de la compétence d'organismes pour l'application de l'article DF4 de l'arrêté du 25 juin 1980 modifié portant approbation des dispositions générales du règlement de sécurité contre les risques d'incendie et de panique dans les établissements recevant du public. Journal Officiel du 8 Août 2006, texte n°5

2.3. NORMES ET STANDARDS

- [7] NF EN 1991-1-2 et Annexe Nationale : « Eurocode 1 Partie 1-2 : Actions sur les structures exposées au feu » Juillet 2003 et NF EN 1991-1-2/NA Février 2007
- [8] NF EN 1992-1-2 et Annexe Nationale : « Eurocode 2 : Calcul des structures en béton – Partie 1-2 : Règles générales – Calcul du comportement au feu », Octobre 2005 et NF EN 1992-1-2/NA Octobre 2007
- [9] NF EN 1993-1-2 et Annexe Nationale : « Eurocode 3 : Calcul des structures en acier – Partie 1-2 : Règles générales – Calcul du comportement au feu », Octobre 2005 et NF EN 1993-1-2/NA Octobre 2007
- [10] NF EN 1995-1-2 et Annexe Nationale : « Eurocode 5 : Conception et calcul des structures en bois – Partie 1.2 : Généralités – Calcul des structures au feu », Septembre 2005 et NF EN 1995-1-2/NA (Avril 2007)
- [11] Norme NF EN 12845 - Installations fixes de lutte contre l'incendie

2.4. DOCUMENTS TECHNIQUES

- [12] Documentation Fire Dynamics Simulator (version 6 - NIST) :
 - User's Guide. K. B. McGrattan, R. McDermott, S. Hostikka, J. Floyd (special publication 1019, 2014)
 - Technical Reference Guide - Volume 2: Verification Guide. K. B. McGrattan, S. Hostikka, R. McDermott, J. E. Floyd, C. Weinschenk & K. Overholt (NIST Special Publication 1018, 2014)
- [13] Hors-série Accidents ferroviaires - Le sapeur-pompier magazine. Septembre 2003.
- [14] Fire Protection Handbook – Section3/Chapter 1 – G. E. Hartzell – Combustion products and their effects on life safety.
- [15] Effets du feu sur les personnes : Analyse bibliographique. LNE Réf. G020284/CEMATE/1. Juillet 2006.
- [16] SFPE HANDBOOK 3rd Ed., 2002, – Section 2 /Chapter 6 –Toxicity assessment of combustion products, ISBN : 087765-451-4
- [17] SFPE HANDBOOK 3rd Ed., 2002, Section2/Chapter 13 – Smoke production and properties, ISBN : 087765-451-4

- [18] SFPE HANDBOOK 3rd Ed., 2002, – Section2/Chapter 4 –Visibility and Human Behavior in Fire Smoke, ISBN : 087765-451-4
- [19] « Parcs de stationnement en superstructure ventilés. Avis d'experts sur les scénarios d'incendie » INERIS 2001.
- [20] Fire Spread in Car Parks, BRE Global, M. Shipp, Meeting of CEN TC191 SC1 WG9, SECO Brussels 23 & 24 November 2009
- [21] Ignition Handbook, Vytenis Babrauskas, FSP SFPE, 2003
- [22] Rousset, P. Choix et validation expérimentale d'un modèle de pyrolyse pour le bois traité par haute température: de la micro-particule au bois massif, ENGREF (AgroParisTech), 2004.
- [23] Di Blasi, C. Modeling chemical and physical processes of wood and biomass pyrolysis. Prog. Energy Combust. Sci. 34, 47–90 (2008).
- [24] Hao, C. « Burning Rate of Solid Wood Measured in a Heat Release Rate Calorimeter », Fire and materials, Vol. 16, 197-206, 1992
- [25] N. Trévisan, "Étude expérimentale et numérique des interactions entre dispositifs d'évacuation naturelle de fumées et de chaleur et systèmes d'extinction automatique à eau", thèse de doctorat, Université de Lorraine, 2019.
- [26] CNPP, Etude n_EP-09.04. 2012
- [27] <https://www.meteo-bordeaux.fr>
- [28] 20-000091d-MDU-RAPPORT-ICADE(Aff 19-005227-BO) note d'hypothèses

3. DESCRIPTION DE L'OUVRAGE

3.1. CARACTERISTIQUES GEOMETRIQUES DU PARC DE STATIONNEMENT

Le parc de stationnement en silo est constitué de 13 demi-niveaux similaires, allant du niveau RDC au niveau R+5 pour un total d'environ 490 places. D'une surface totale d'environ 12 000 m² (les dimensions d'un niveau sont d'environ 63 m x 33 m), il est ouvert sur trois façades

L'ouvrage est contigu à deux bâtiments d'habitation sur la 4^{ème} façade. Le degré coupe-feu de la paroi d'isolement sera au moins égal au degré de stabilité au feu de l'établissement le plus exigeant, soit 1h30 (REI90). La stabilité au feu du mur d'isolement ne dépendra pas de celle du parc de stationnement.

Les dalles en béton sont supportées par une structure (poteaux et poutres) en bois. Le parc de stationnement. Le désenfumage est effectué naturellement via les ouvertures en façade.

Les différentes vues du projet sont présentées sur les figures suivantes :

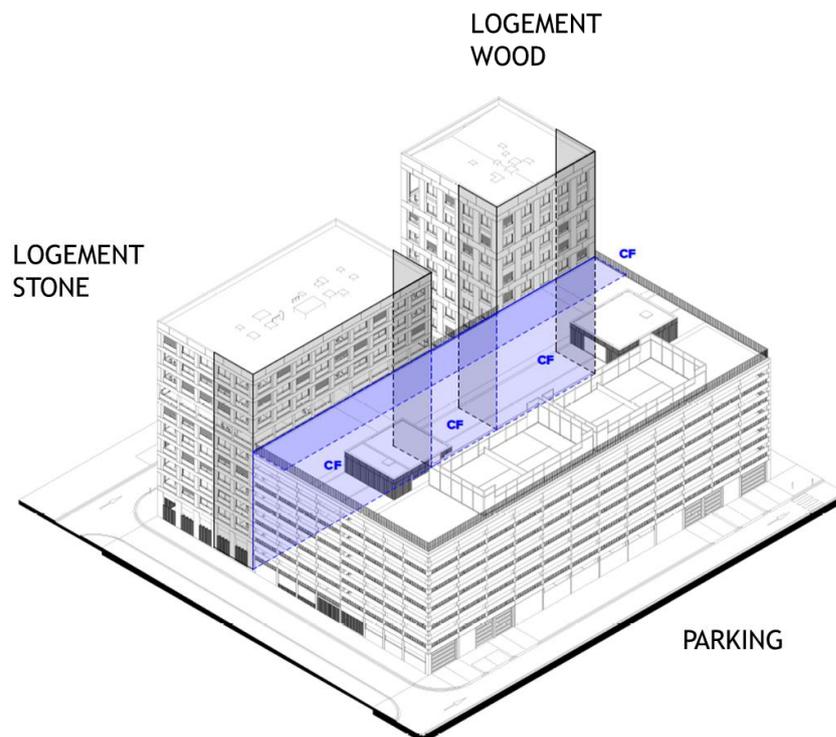


Figure 3-1 : Vue 3D du projet

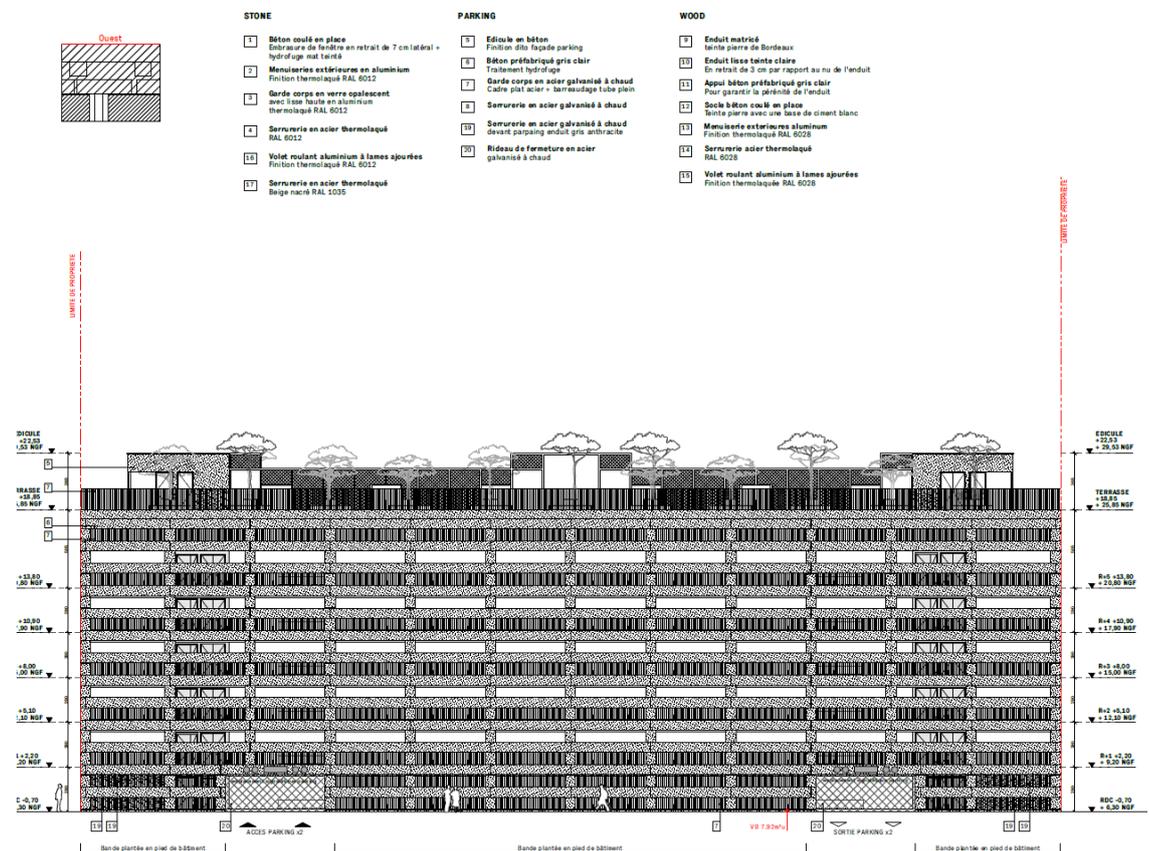
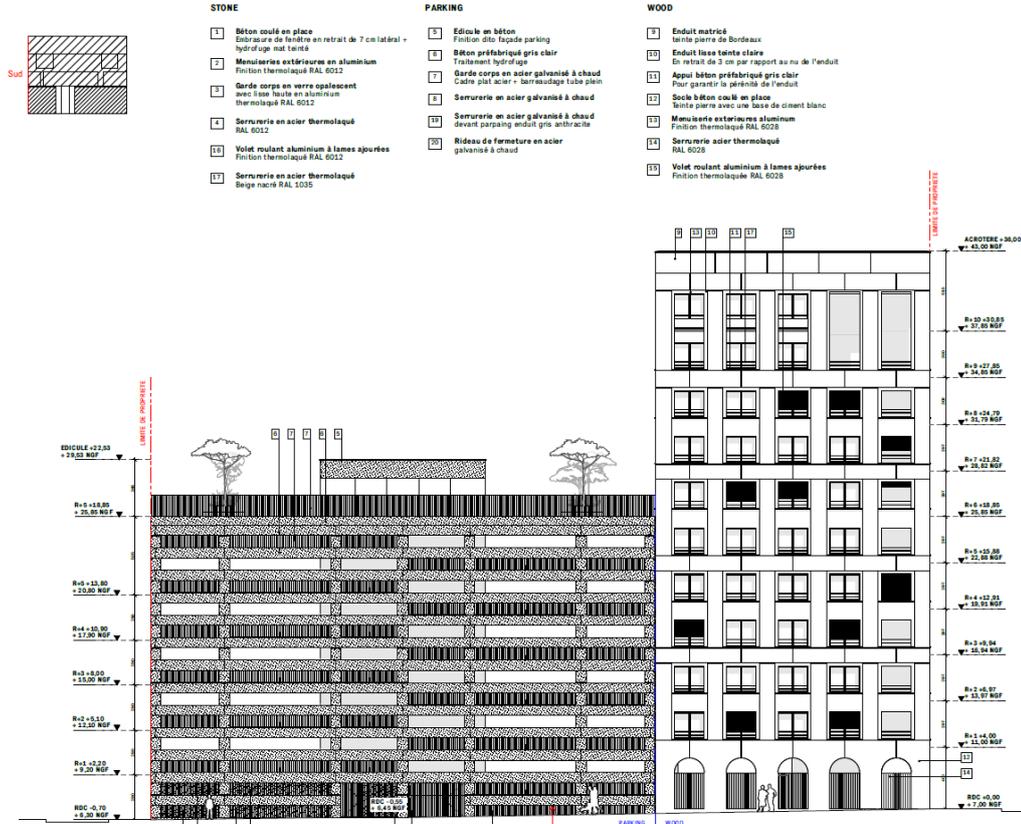


Figure 3-3 : Façade OUEST

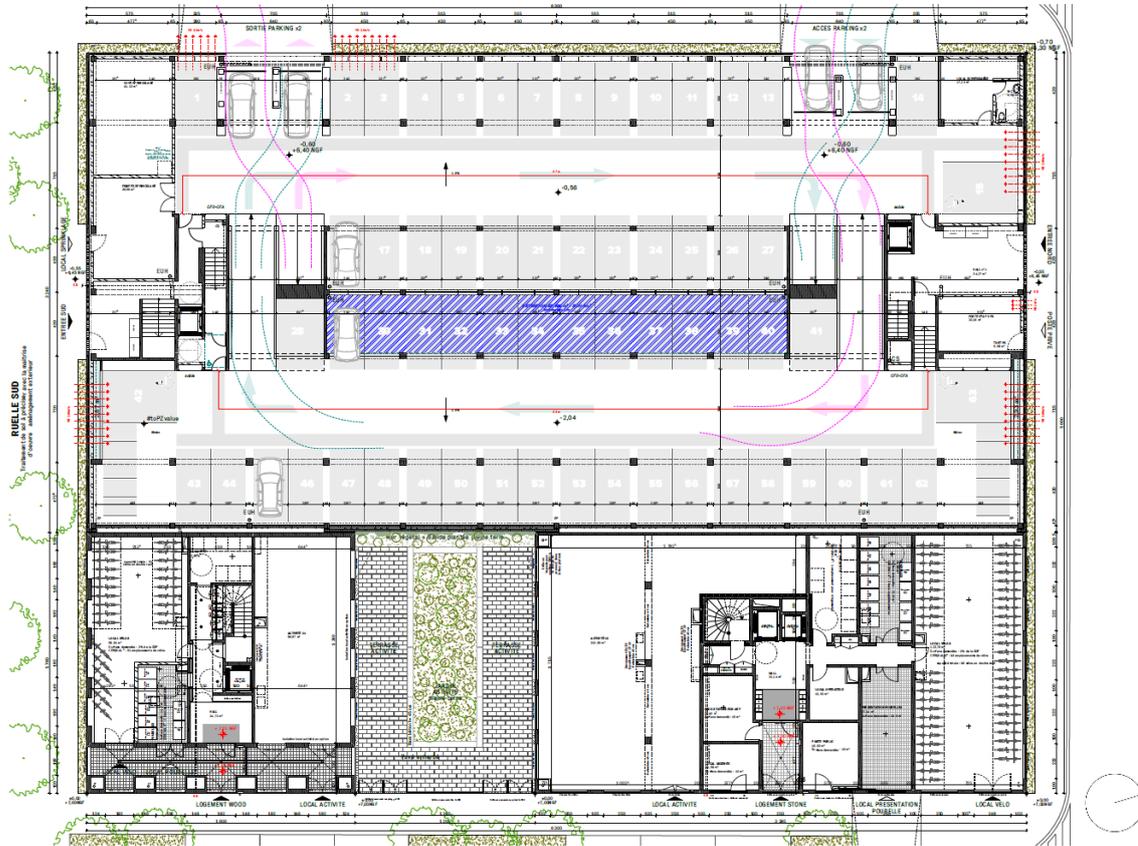


Figure 3-4 : Vue en plan du RDC

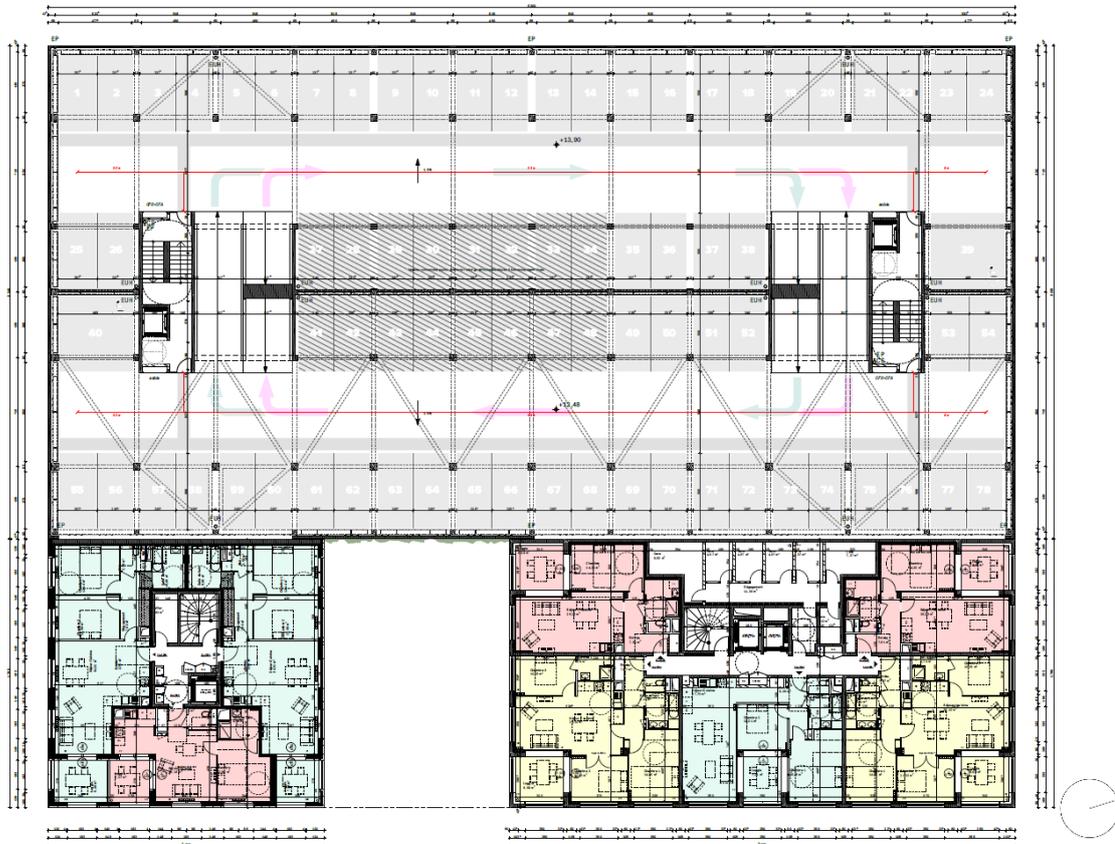


Figure 3-5 : Vue en plan d'un niveau

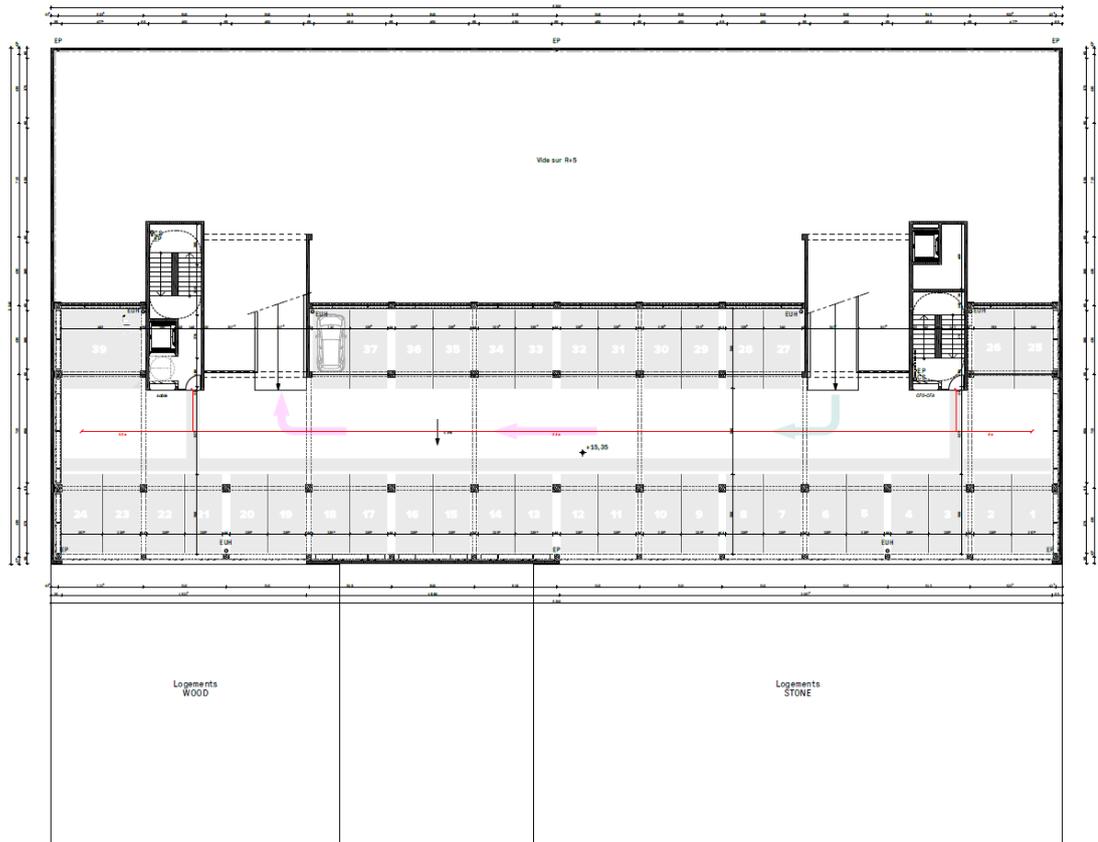


Figure 3-6 : Vue en plan du dernier niveau de stationnement des véhicules

3.2. INSTALLATION FIXE D'EXTINCTION AUTOMATIQUE A EAU

Le parc de stationnement sera équipé d'une installation fixe d'extinction automatique à eau de type sprinkleur. A ce stade du projet, le futur matériel installé n'a pas encore été sélectionné. Le dimensionnement devra être prévu conformément aux référentiels en vigueur [11].

Les caractéristiques connues sont les suivantes :

- Risque OH2
- Taux d'application : 5 L/min/m²
- Tête Type debout
- Facteur nominal K80
- Température de déclenchement : 93°C

Un total de 192 têtes de sprinkler par niveau, avec au moins une tête au-dessus de chaque véhicule, sera installé comme indiqué sur la vue en plan ci-après :

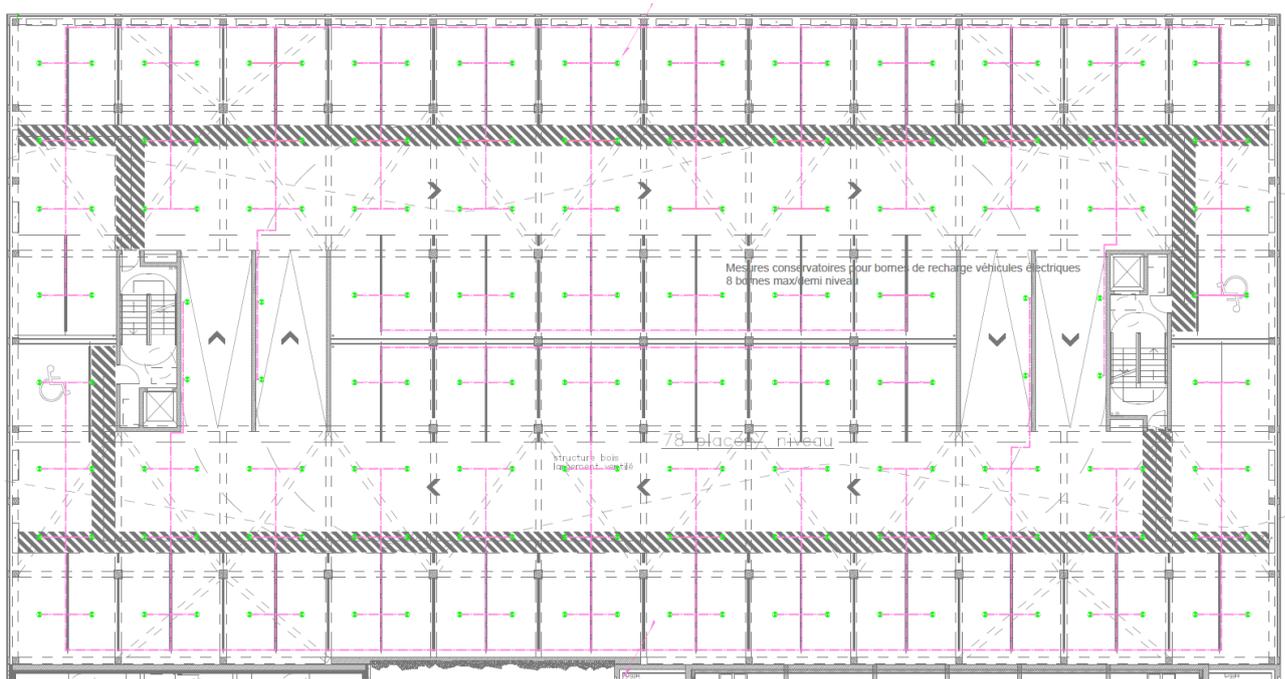


Figure 3-7 : Plan d'implantation des têtes de sprinkler

4. METHODOLOGIE

Préambule : Sur la base d'étude de scénarios réels d'incendie et de calculs avancés, cette étude a pour objectif de vérifier que le sinistre ne conduit pas à un auto-entretien de la combustion du bois après extinction du foyer primaire (feu de véhicules) et que la contribution du bois ne conduit pas à la non stabilité des structures. Cette étude s'inscrit donc bien dans une approche performantielle d'une étude d'ingénierie incendie. On pourra alors s'appuyer sur la démarche de l'arrête du 22 mars 2004 modifié [5] en matière de résistance au feu comme indiqué dans le PS7 [4]. Toutefois, on laissera au SDIS33 le soin de définir les contours réglementaires d'application de l'étude à entreprendre.

4.1. PHASE 1 : DEFINITION DES OBJECTIFS, DES CRITERES DE PERFORMANCE ET DES SCENARIOS D'INCENDIE REEL

La première phase de l'étude consiste en une analyse de plans, des différents documents nécessaires à la réalisation de l'étude de façon à définir les objectifs de sécurité et les hypothèses de calculs en accord avec les spécificités des contraintes de site, des caractéristiques des projets architecturaux et des contraintes programmatiques définies en amont par la maîtrise d'ouvrage. Sur la base de cette analyse, les scénarios d'incendie seront définis.

Dans un premier temps, le développement du feu sera libre.

Puis, on propose dans un second temps, que le système d'extinction automatique soit pris en compte (usage non classique en étude ISI) car relevant d'une mesure supplémentaire.

Si les scénarios d'incendie de véhicules en PSLV sont bien connus en termes de débit calorifique, durée et propagation, le développement sous sprinkler est plus délicat à définir car dépendent de nombreux paramètres. En outre, la modélisation de l'action des gouttes sur le feu lui-même et l'ambiance nécessite des modèles physiques bien trop complexes et scientifiquement sensibles pour être employés à l'échelle d'une étude d'ingénierie. Des hypothèses accompagnant un modèle simple et robuste sont proposées § 5.

A l'issue de cette phase, un rapport de scénario sera rédigé et présenté aux autorités pour validation. Ce rapport présentera également la méthodologie envisagée pour l'étude, les objectifs de sécurité et les critères de performance associés.

Cette phase a fait l'objet d'un document indépendant soumis aux autorités [28].

4.2. PHASE 2 : MODELISATION DU DEVELOPPEMENT DU FEU

Cette étape consiste à réaliser, sur la base de la configuration réelle envisagée, une modélisation du développement du feu.

La prise en compte de la combustion du bois avec ignition/extinction sera intégrée sur la base d'un argumentaire scientifique. En fonction du scénario d'incendie réel défini, les agressions en termes de température ou de flux thermique en fonction du temps, reçues par les éléments de la structure et les éléments combustibles ont été déterminées à partir de modèles de développement du feu. Ces agressions thermiques, associées à des critères d'allumage simples ont permis de prendre en compte les phénomènes de propagation aux éléments en bois dans le volume.

La modélisation des volumes a été réalisée en utilisant le modèle de champ utilisé FDS. Il permet la modélisation tridimensionnelle des volumes en y intégrant les obstacles, les murs et les ouvrants Cet outil prend en compte les conditions d'échanges thermiques au niveau des parois, les conditions d'évacuation des gaz chauds et l'admission d'air frais.

4.3. PHASE 3 : ANALYSE ET CONCLUSIONS

Sur la base des agressions thermiques en termes de flux ou températures affectant les éléments structuraux et de compartimentage, une analyse préliminaire a été réalisée afin d'indiquer le caractère aggravant de la contribution du bois sur le niveau de performance réglementaire des structures et du compartimentage.

Sur la base des agressions, le bureau d'étude du projet a pu déterminer les nouvelles sections critiques des éléments de structures bois. L'analyse consistera alors à s'assurer que cette section critique est comparable ou inférieure à celle initialement calculée pour une durée de 90 minutes.

L'objectif est de démontrer que la contribution du bois reste acceptable pour la tenue des structures sur la durée prescrite demandée et de connaître les délais de ruine de l'ouvrage. L'étude permet également d'apprécier l'impact du vent et du système d'extinction à eau sur le comportement du feu.

5. PROPOSITION DE SCENARIO

5.1. SCENARIOS DE FEU LIBRE DE VEHICULES

5.1.1. Débit calorifique et développement de feu pour le feu de véhicules

Les foyers vont faire intervenir des véhicules légers de classe 3. Les feux de véhicules et en particulier dans le contexte d'un incendie pouvant survenir dans un parc de stationnement, ont fait l'objet de diverses analyses par le CTICM en termes de débit calorifique et de mode de propagation. Ces recherches ont fait l'objet :

- d'un avis favorable du CECMI sur la méthode de calcul développée et faisant suite à une analyse du CSTB ;
- d'un avis de la CCS sur les scénarios proposés, précisant en particulier la non-propagation du feu au-delà d'une voie de roulement ;
- d'une tierce expertise de la part de l'INERIS [19] conduisant à définir des scénarios enveloppes.



Figure 5-1 : Essai de feu réel de véhicules légers - CTICM/EFFECTIS France

Ces différents documents synthétisés dans le rapport de l'INERIS [19] mettent en avant différents scénarios de feux de véhicules, qui doivent être choisis en fonction du parc de stationnement étudié (géométrie, activité, ...). En particulier, les scénarios génériques de feux de véhicule doivent être adaptés à la structure du parc de stationnement étudié.

La Figure 5-2 présente l'évolution du débit calorifique pour les véhicules dans deux configurations :

- Soit le véhicule est à l'origine du départ de feu, auquel cas la durée d'induction avant le pic de puissance maximale du feu est d'environ 15 min ;
- Soit le véhicule est sujet à la propagation du feu depuis un véhicule voisin, auquel cas la durée d'induction avant le pic de puissance maximale est réduite à 10 min à cause du phénomène de préchauffage

Les débits calorifiques pour les véhicules de classe 3 sont basés sur des essais ayant été réalisés par le CTICM [19]. Les propriétés thermo-chimiques du polyuréthane, qui est un matériau très fumigène, seront utilisées.

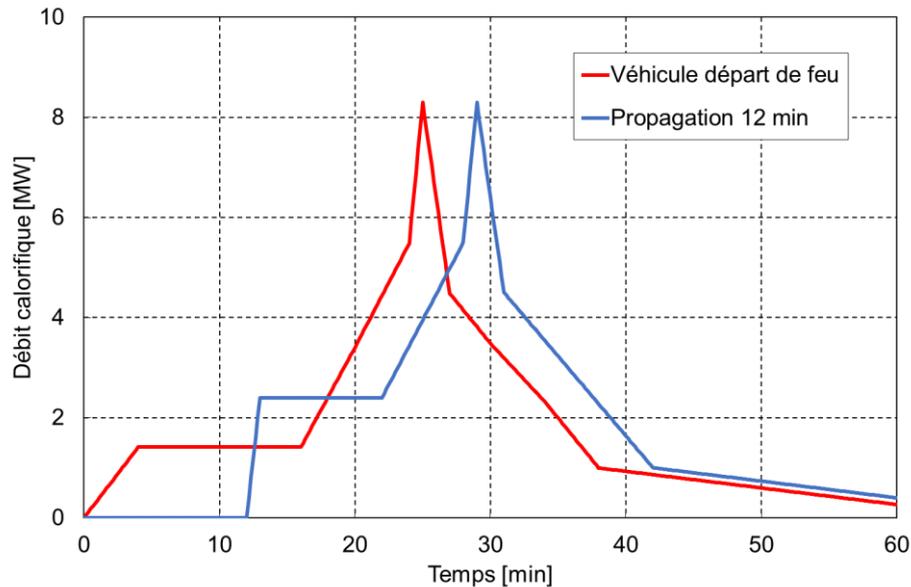


Figure 5-2 : Evolution temporelle du débit calorifique pour les véhicules de classe 3

Suite aux essais réalisés par CTICM/Efectis France et conformément à l'accord de l'INERIS [15], il est considéré que le temps à prendre en compte pour la propagation du feu d'un véhicule léger à un autre est typiquement de l'ordre de 12 minutes.

Comme indiqué dans le rapport de l'INERIS [15], les véhicules situés de l'autre côté d'une voie de circulation ne sont pas considérés comme pouvant participer au développement du feu (au moins dans sa phase de développement initiale), car la largeur des voies de circulation, généralement proche de 5 m, empêche la propagation du feu.

Le mode de propagation est représenté ci-dessous :

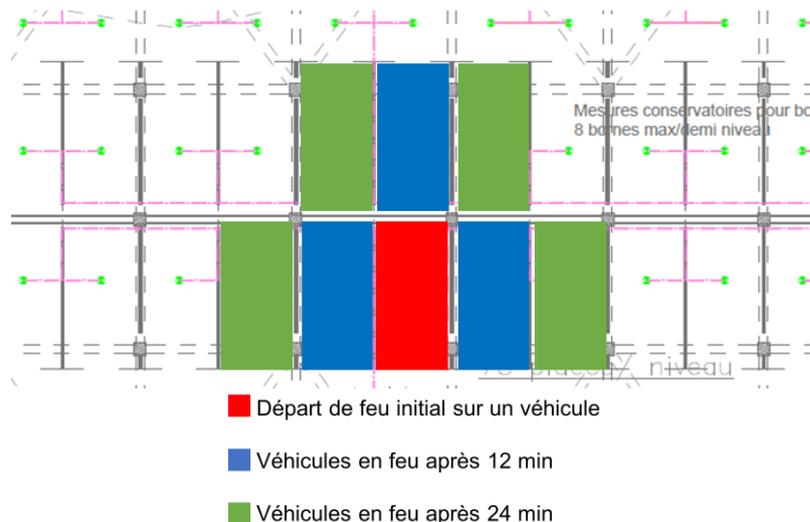


Figure 5-3 : Schématisation du mode de propagation et des véhicules impliqués

Remarque : ces courbes de débit calorifiques et les délais de propagation ne sont applicables que pour des parcs de stationnement largement ventilés

Lorsque le feu se développe dans deux rangées de véhicules face à face, cette propagation se fait de proche en proche comme indiqué dans le Tableau 5-1 et comme représenté schématiquement sur Figure 5-3.

Véhicules impliqués	Temps d'ignition [min]	Couleur correspondante
1 véhicule de classe 3	$t_0 = 0$	Rouge
3 véhicules de classe 3 adjacents	$t_1 = 12$	Bleu
4 véhicules de classe 3 adjacents	$t_2 = 24$	Vert

Tableau 5-1 : Récapitulatif de la propagation aux véhicules impliqués sur deux rangées

Cette propagation amène à considérer l'évolution du débit calorifique global en fonction du temps. La figure ci-dessous présente le débit calorifique pour un feu de 8 véhicules sur une heure d'incendie.

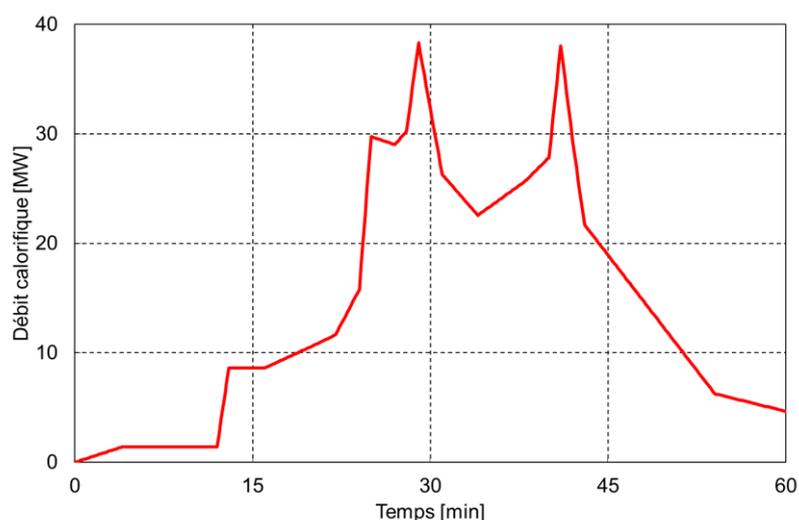


Figure 5-4 : Évolution temporelle du débit calorifique total pour un incendie 8 véhicules

Ainsi, le départ de feu impliquant 8 véhicules sera contrôlé manuellement par intervalle de 12 minutes. La propagation aux autres véhicules présents dans le parc de stationnement sera automatisée. Pour cela, on se basera des valeurs obtenues expérimentalement par Efectis France dans le cadre d'une précédente étude. Le Tableau 5-2 présente des délais d'inflammation de pneus de véhicules en fonction de la densité de flux thermique reçu. La propagation du feu à un véhicule situé dans le parc de stationnement dépend donc fortement du temps d'exposition au flux. De manière sécuritaire, le critère de propagation de 8 kW/m² sera retenu.

Flux thermique [kW/m ²]	Temps [s]
8,00	2270
9,00	1690
10,03	1290
15,02	470
19,99	240

Tableau 5-2 : Délais d'inflammation de pneus de véhicules en fonction de la densité de flux reçu

5.1.2. Localisation des foyers

Il est proposé de retenir un scénario d'incendie situé au niveau R+1 (Figure 5-5). Il s'agit du niveau le plus pénalisant en termes de potentiel calorifique. En effet, les sections retenues pour la structure sont plus importantes à ce niveau. De plus, cela permet d'étudier le risque de propagation vers les demi-niveaux supérieurs. Il s'agit d'un feu de 8 véhicules sur deux rangées. Cette position a été retenue afin d'étudier le risque de propagation du feu aux éléments combustibles en bois.

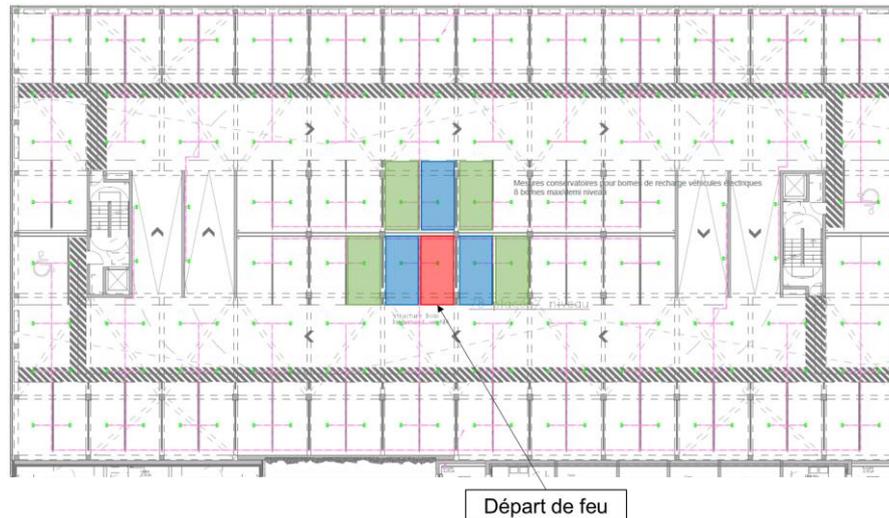


Figure 5-5 : Localisation du foyer considéré au R+1

5.2. PRISE EN COMPTE DE LA CONTRIBUTION DES ÉLÉMENTS EN BOIS

Un des objectifs de l'étude consiste à prendre en compte l'impact des éléments de structure en bois. Il est donc nécessaire de déterminer les conditions et la surface de propagation du foyer sur ces éléments et d'en quantifier la contribution.

Les principaux paramètres à prendre en compte pour les modélisations sont :

- Les propriétés thermiques du bois ;
- La température d'inflammation pilotée ;
- Le débit calorifique en fonction de l'agression thermique reçue.

Pour les propriétés thermiques du bois, conductivité thermique et chaleur spécifique, les données indiquées dans les Eurocodes [10]. La masse volumique du bois considéré est de 450 kg/m^3 [10].

La température d'ignition dépend fortement de l'essence de bois considérée, de l'exposition thermique et de la géométrie de l'élément en bois. Elle varie généralement de 250 à 350°C [22][23][24]. Dans le cadre de cette étude, un critère d'allumage/extinction de 300°C est retenu. Ce critère est jugé suffisamment sécuritaire, et fait consensus dans la communauté des laboratoires incendie. Ainsi, lorsque la température de surface des éléments de structure en bois est supérieure à 300°C , il y a combustion du bois. De la même façon, lorsque la température redescend en dessous de ce critère, il y a extinction¹.

Pour tenir compte de l'extinction par épuisement du combustible, un critère de masse consommée est considéré, lorsque 80 % de la masse totale de bois est consommée².

Quelques données issues de travaux expérimentaux [24] présentées dans le Tableau 5-3 montre que le débit de pyrolyse libéré par la combustion du bois varie en fonction du flux thermique reçu. On propose alors de

¹ On parlera dans ce cas d'extinction de la combustion sans flammes. Le modèle n'est pas à même de reproduire les phénomènes d'incandescence.

² On considère qu'il y a 20% de cendres et d'imbrûlés

retenir l'évolution présentée Figure 5-6. On reliera ce débit de pyrolyse au débit calorifique en considérant une chaleur de combustion du bois de 17,5 MJ/kg [10].

Séquoia		Pin		Chêne	
Flux incident [kW/m ²]	Débit calorifique [kW/m ²]	Flux incident [kW/m ²]	Débit calorifique [kW/m ²]	Flux incident [kW/m ²]	Débit calorifique [kW/m ²]
17,8	39,0	17,4	45,0	18,7	48,7
38,5	61,2	38,6	77,0	37,8	65,4
56,3	90,2	56,0	124,4	53,6	113,7

Tableau 5-3 : Exemple de débits calorifiques surfaciques obtenus expérimentalement [24]

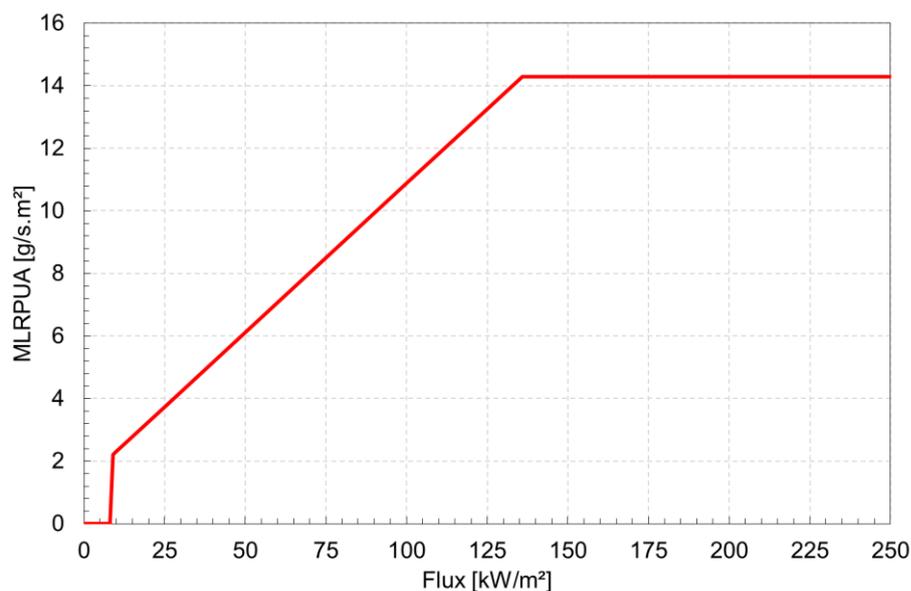


Figure 5-6 : Évolution du débit de pyrolyse du bois [g/m².s] en fonction du flux thermique incident reçu [kW/m²]

Remarque : les valeurs proposées sont théoriques et supposées enveloppes du bois de charpente. Au besoin des essais spécifiques sur des échantillons de BLC proposé par le constructeur pourrait être réalisé pour fournir des données sur la température réelle d'ignition, le débit de pyrolyse en fonction du flux incident et également la composition des gaz et effluents pour apprécier la toxicité.

5.3. PRISE EN COMPTE DU VENT

À la demande du SDIS33, l'effet du vent sur le comportement du feu et des fumées sera étudié. Cette condition de vent sera prise en compte sur un scénario de feu sans prise en compte du système automatique d'extinction.

En prenant l'hypothèse des vents dominants dans la zone considérée (Figure 5-7), un vent de Nord-Ouest sera considéré pour une vitesse de 30 km/h (Figure 5-8).

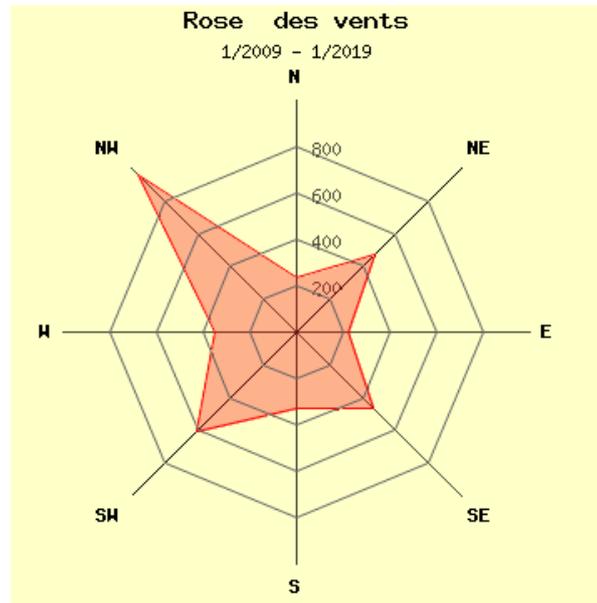


Figure 5-7 : Rose des vents sur la période 2009-2019 (station Yvrac) [27]

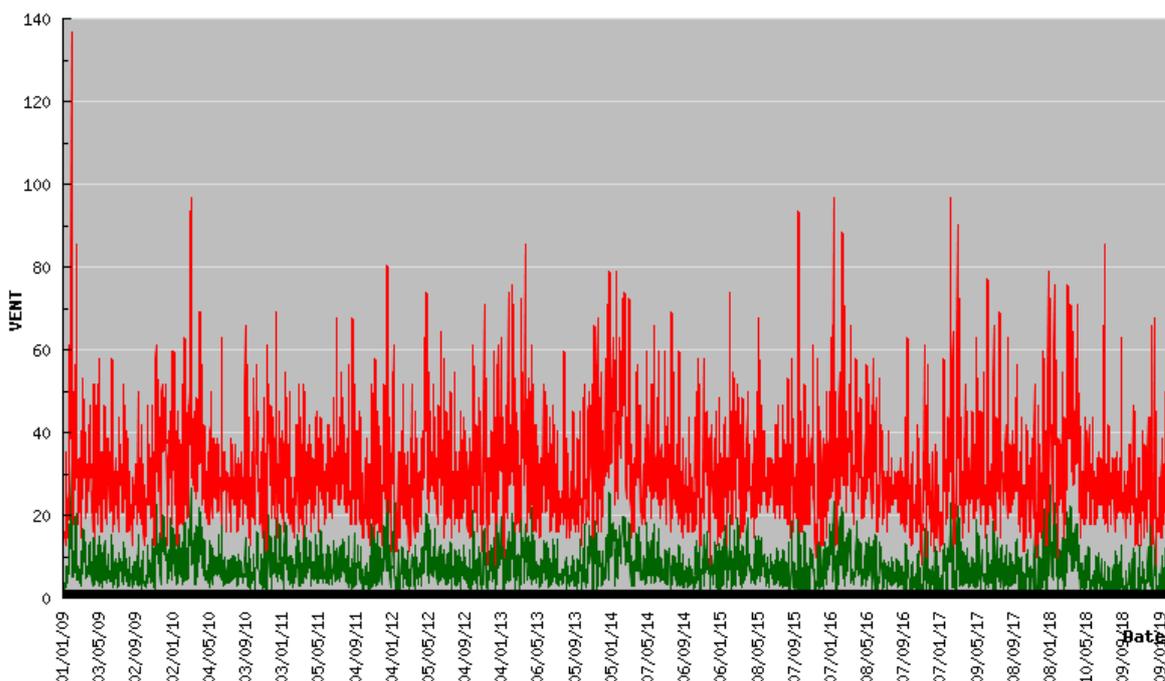


Figure 5-8 : Vitesses moyenne et maximale des vents sur la période 2009 à 2019 (station Yvrac) [27]

5.4. PRISE EN COMPTE DES EFFETS DE L'EAU SUR LE DEVELOPPEMENT DU FEU

Le développement d'un incendie sous sprinkler est plus délicat à définir car il est dépendant de nombreux paramètres. Des essais de feux de véhicules avec un système d'extinction ont montré l'absence de développement significatif et de propagation pendant toute la durée d'activation du système [20].

La modélisation de l'action des gouttes sur le feu lui-même et l'ambiance nécessite des modèles physiques bien trop complexes et scientifiquement sensibles pour être employés à l'échelle d'une étude d'ingénierie de désenfumage. Un modèle de contrôle de la courbe de libéralisation d'énergie est donc choisi. Le débit calorifique du foyer et la propagation aux véhicules adjacents sont supposés contrôlés par le nombre de têtes de sprinkler actives. Le premier véhicule ne sera pas contrôlé par le système automatique à eau.

Dans la majorité des incendies en présence d'un système d'extinction automatique conforme, le foyer peut être maîtrisé avant qu'il n'ait pu se propager et prendre de l'importance. Une étude menée par le CNPP pour la Fédération Française de l'Assurance (FFA, ex FFSA) a montré que dans près de 95% des cas, un incendie est contrôlé par moins de 5 têtes de sprinkleurs [25][26].

Ce nombre de 5 têtes actives est alors proposé pour signifier le contrôle du développement du feu. Par exemple, si la 5^{ème} tête de sprinkler est activée aux environs de 20 minutes, la courbe de débit calorifique total retenue sera la suivante :

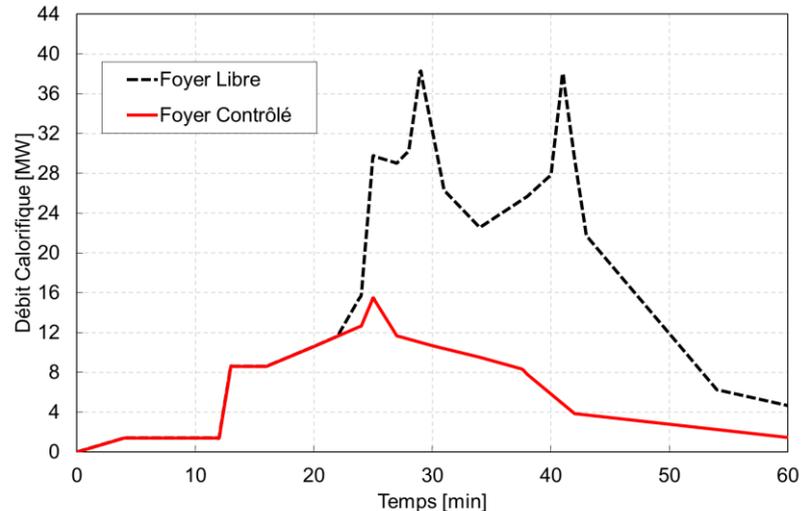


Figure 5-9 : Exemple de courbe de feu contrôlé par le système d'extinction à eau

Les effets du système de sprinklage sur la puissance du feu seront donc pris en compte dans la modélisation par la réduction de la courbe de puissance. Les effets directs du refroidissement de l'eau sur les gaz et les structures ne seront pas modélisés, car les modèles ne permettent pas de bien reproduire, à cette échelle et pour ce type de foyer, ces phénomènes sur des matériaux solides en combustion (bois).

Cependant, les effets de l'eau sur le refroidissement des gaz chauds et donc sur l'activation du système d'extinction seront modélisés dans une première simulation (sans prise en compte de la contribution du bois) afin de déterminer des délais d'activation des têtes plus pénalisants, car retardés du fait du refroidissement de l'ambiance par l'arrosage en eau.

5.5. SYNTHÈSE DES SCÉNARIOS

Dans le cadre de l'étude, les scénarios qui ont été proposés sont synthétisés dans le tableau ci-dessous. Il s'agit des foyers initiaux avant propagation à l'ensemble des véhicules et contribution des éléments en bois.

Scénario	Localisation	Vent	Système d'extinction à eau	Nombre de véhicules au départ du feu	Combustible
1	R+1	Sans	Sans	8	100% Polyuréthane (+ contribution bois)
2	R+1	Avec	Sans	8	
3	R+1	Sans	Avec	Fonction du système d'extinction	

Tableau 5-4 : Synthèse des scénarios proposés

Note 1 : Les hypothèses de ces scénarios sont très sécuritaires, que ce soit pour la combustion des éléments de la structure en bois ou pour la propagation de véhicule à véhicule.

Note 2 : Il n'a pas été retenu de scénario extérieur de feu donnant sur une façade extérieure, car celles-ci sont majoritairement en béton au RdC, étage non PSLV.

Note 3 : Les résultats obtenus sont transposables d'un demi-niveau à l'autre.

6. MODELISATION ET HYPOTHESES DE CALCUL

6.1. OUTILS DE MODELISATION

Les calculs CFD du volume du niveau courant sont effectués avec FDS version 6.5.2.

Le modèle de champ FDS résout numériquement les équations d'écoulements à faible vitesse engendrés par des gradients thermiques, avec un accent particulier sur le transport des fumées et de la chaleur générée par un feu. Il implémente un modèle de combustion par réaction chimique de mélange, un modèle de turbulence Large Eddy Simulation (LES), et un autre de transport radiatif. Il traite les transferts de chaleur et de masse depuis et vers les interfaces solides, auxquelles sont assignées des conditions limites thermiques.

Le logiciel FDS a fait l'objet d'ajustements et de validations dans le domaine de la sécurité incendie au sein d'Efectis France, en particulier au travers de confrontations à des essais à l'échelle 1 dans un parc de stationnement. Efectis utilise maintenant ce code depuis de nombreuses années.

6.2. GEOMETRIE DU PARC DE STATIONNEMENT

La configuration du parking est modélisée sur un maillage cartésien 3D, chaque maille mesurant 25 cm de côté :

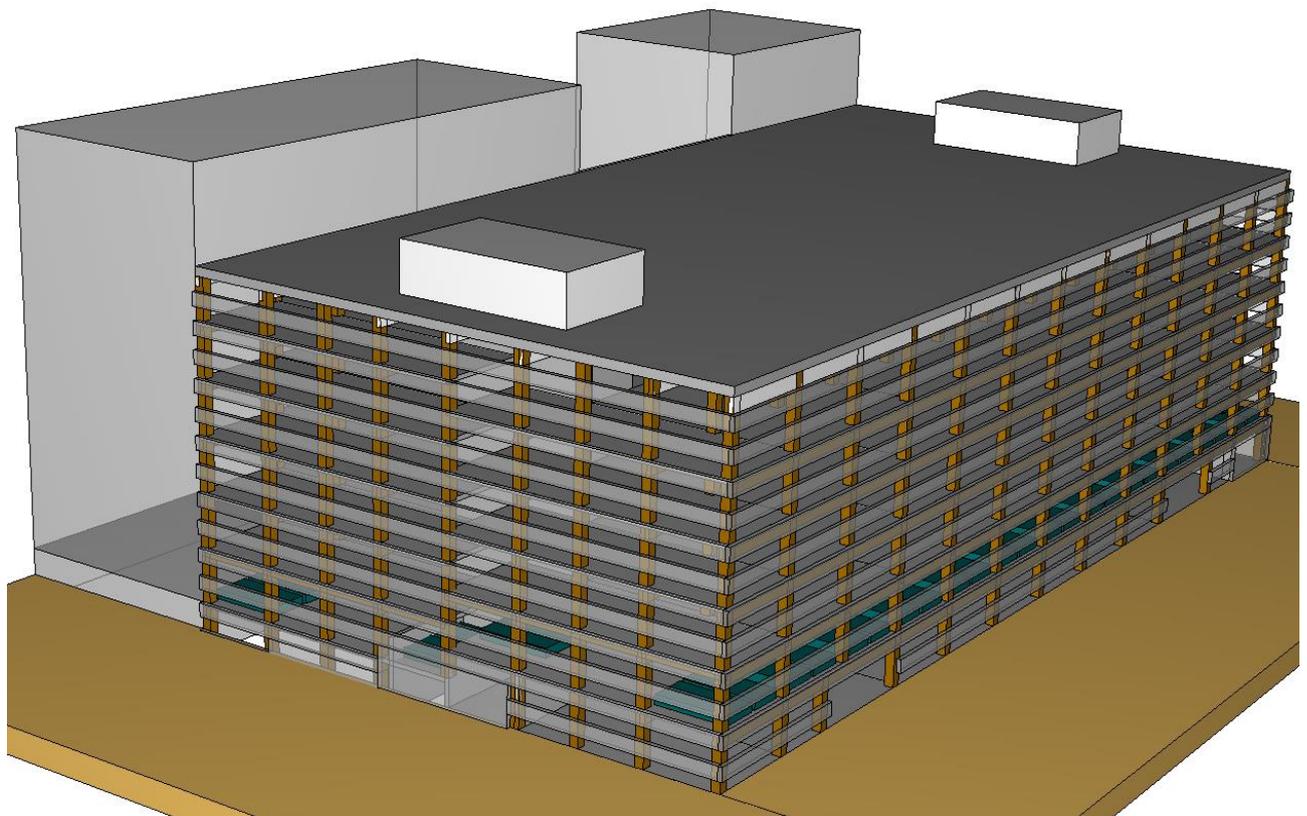


Figure 6-1 : Vue 3D du modèle complet du parc de stationnement

Le domaine de calcul retenu concerne 2 demi-niveaux, depuis le plancher bas du demi-niveau inférieur jusqu'au plancher haut du demi-niveau supérieur. Il est étendu de quelques mètres devant les amenées d'air aux façades et comporte 700 000 mailles.

La hauteur de chaque demi-niveau du modèle est de 2,75 m sous dalle, avec une retombée de poutre de 0,5 m et une retombée de buton et de contreventement de 0,25 m. Les obstacles des rampes et des blocs des cages d'escaliers sont aussi représentés.

Deux voilages filants de 0,75 m de hauteur habillent la façade en rive à chaque demi-niveau. S'y présentent successivement un vide avec garde-corps non représenté servant d'amenée d'air de 0,75 m au-dessus du plancher du demi-niveau, suivi d'un premier voilage filant de 0,75 m de hauteur, puis d'un deuxième vide servant d'amenée d'air de 0,75 m suivi d'un deuxième voilage filant de 0,75 m jusqu'au plancher bas du demi-niveau supérieur.

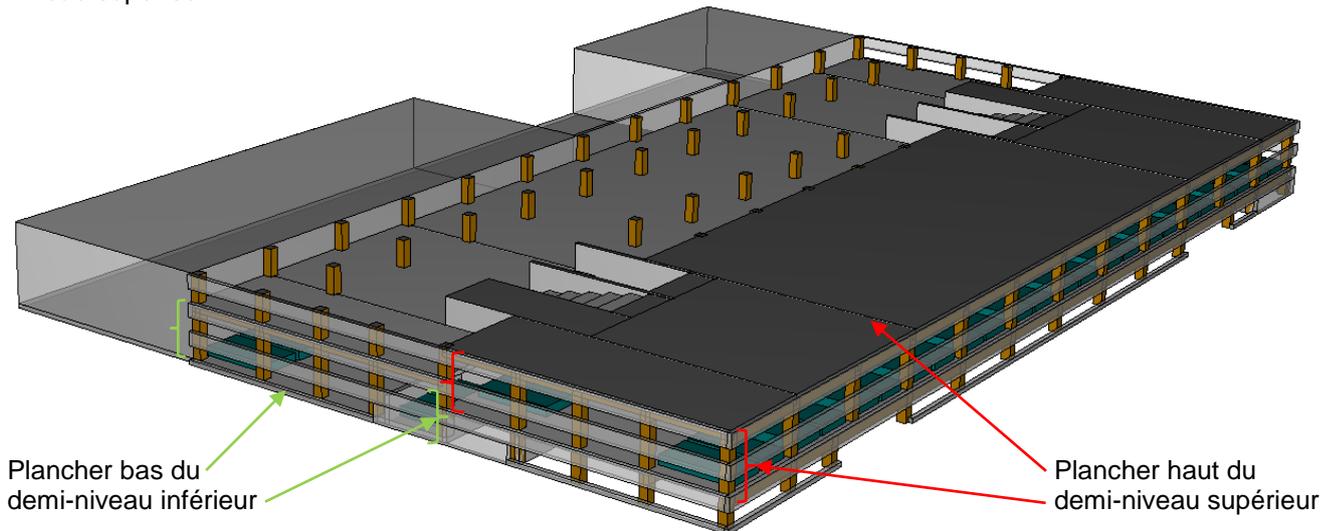


Figure 6-2 : Vue 3D du modèle sur 2 demi-niveaux du parc de stationnement

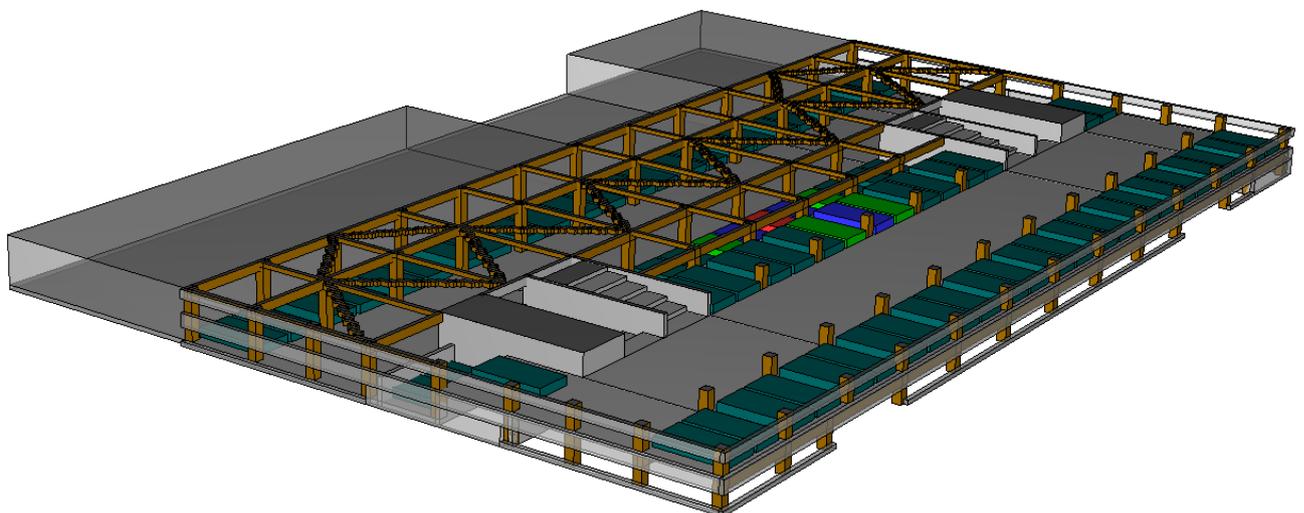


Figure 6-3 : Vue 3D en coupe horizontale du modèle sur 2 demi-niveaux du parc de stationnement



Figure 6-4 : Vue 3D en coupe verticale du modèle sur 2 demi-niveaux du parc de stationnement

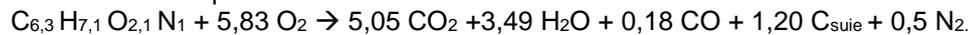
6.3. COMBUSTIBLES

Le modèle de feu doit ici être représenté par 2 combustibles différents. Il y a donc 2 réactions de combustion : celle des véhicules (en rouge, bleu et vert sur les figures ci-dessus), et celle du bois des poutres et poteaux (en marron sur les figure ci-dessus).

Le combustible retenu pour les véhicules est composé à 100% de polyuréthane, dont les caractéristiques thermochimiques sont les suivantes :

- composition : $C_{6,3} H_{7,1} O_{2,1} N$
- taux massique de production de suie : 1,0%,
- taux massique de production de monoxyde de carbone (CO) : 3,8%
- chaleur de combustion : 26 MJ.kg⁻¹.

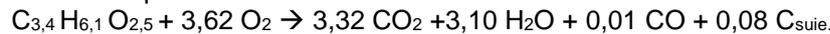
La réaction bilan stœchiométrique simulée s'écrit :



Le combustible retenu pour les poutres et poteaux est composé à 100% de cellulose (bois), dont les caractéristiques thermochimiques sont les suivantes :

- composition : $C_{3,4} H_{6,1} O_{2,5} N_0$
- taux massique de production de suie : 1,0%,
- taux massique de production de monoxyde de carbone (CO) : 0,4%
- chaleur de combustion : 17, MJ.kg⁻¹.

La réaction bilan stœchiométrique simulée s'écrit :



35% de la chaleur produite par le foyer est dissipée par rayonnement, et le reste par convection (valeurs utilisées par défaut par FDS [12]).

6.4. MATERIAUX

Les éléments en béton du parc de stationnement sont modélisés par un matériau de type béton, permettant des transferts, quoique très lents, de chaleur entre le fluide et le mur solide. Les poteaux et la poutraison sont modélisés par un matériau de type cellulose (bois), prenant en compte les échanges de chaleur convectif et radiatif à l'interface fluide-solide.

7. RESULTATS ET ANALYSES

7.1. SCENARIO 1

Ce scénario simule un incendie généralisé des véhicules et de la structure en bois sur 2 demi-niveaux sans action du système d'extinction automatique à eau.

Il a pour objectif d'estimer les actions thermiques subies par la structure en bois, sa contribution à l'incendie, ainsi que les conditions d'intervention des services de secours après un départ de feu de véhicule dans ce parc de stationnement. Il s'agit du scénario le plus critique de cette étude.

7.1.1. Débit calorifique

La figure suivante montre l'évolution du débit calorifique total, ainsi que la part attribuable aux véhicules et celle attribuable aux éléments en bois de la structure.

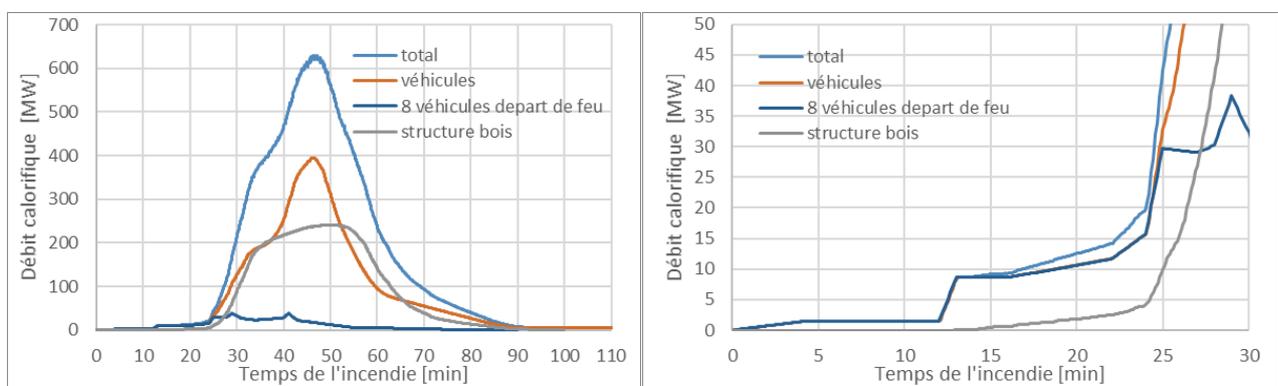


Figure 7-1 : Évolution des débits calorifiques (gauche : durée totale, droite : zoom sur le début)

La généralisation de l'incendie à tous les véhicules entraîne la généralisation à l'ensemble des éléments de structure en bois. L'évolution du débit calorifique total est liée à celle des véhicules. Les éléments en bois commencent à contribuer à l'incendie à partir de quinze minutes. Cette contribution se généralise à partir de 24 minutes lors de la généralisation de l'incendie aux autres véhicules. La contribution maximale de 240 MW est atteinte après 50 minutes de feu. De plus, elle cesse une dizaine de minutes après l'extinction des véhicules à 84 minutes. La combustion/extinction des véhicules induit celle des éléments en bois de la structure.

La figure suivante montre qu'après l'allumage piloté des 8 premiers véhicules, l'incendie se propage à tous les autres véhicules des 2 demi-niveaux, et ce de façon très rapide entre 24 et 33 minutes. On rappelle que l'hypothèse de propagation d'un véhicule à l'autre est prise de façon sécuritaire à partir d'un flux thermique reçu de 8 kW/m².

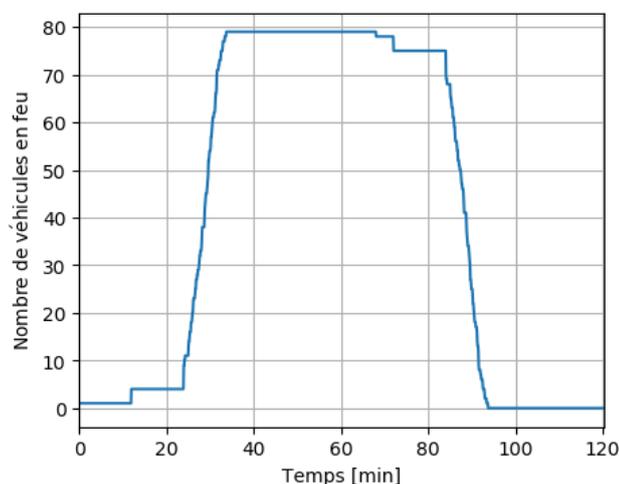


Figure 7-2 : Évolution du nombre de véhicules en feu

7.1.2. Sollicitations thermiques sur le bois

L'évolution de la température sur paroi induite par l'incendie sur le plafond et les éléments de structure en bois est présentée sur la figure suivante en vue de dessous. L'ensemble des éléments est impacté par l'incendie.

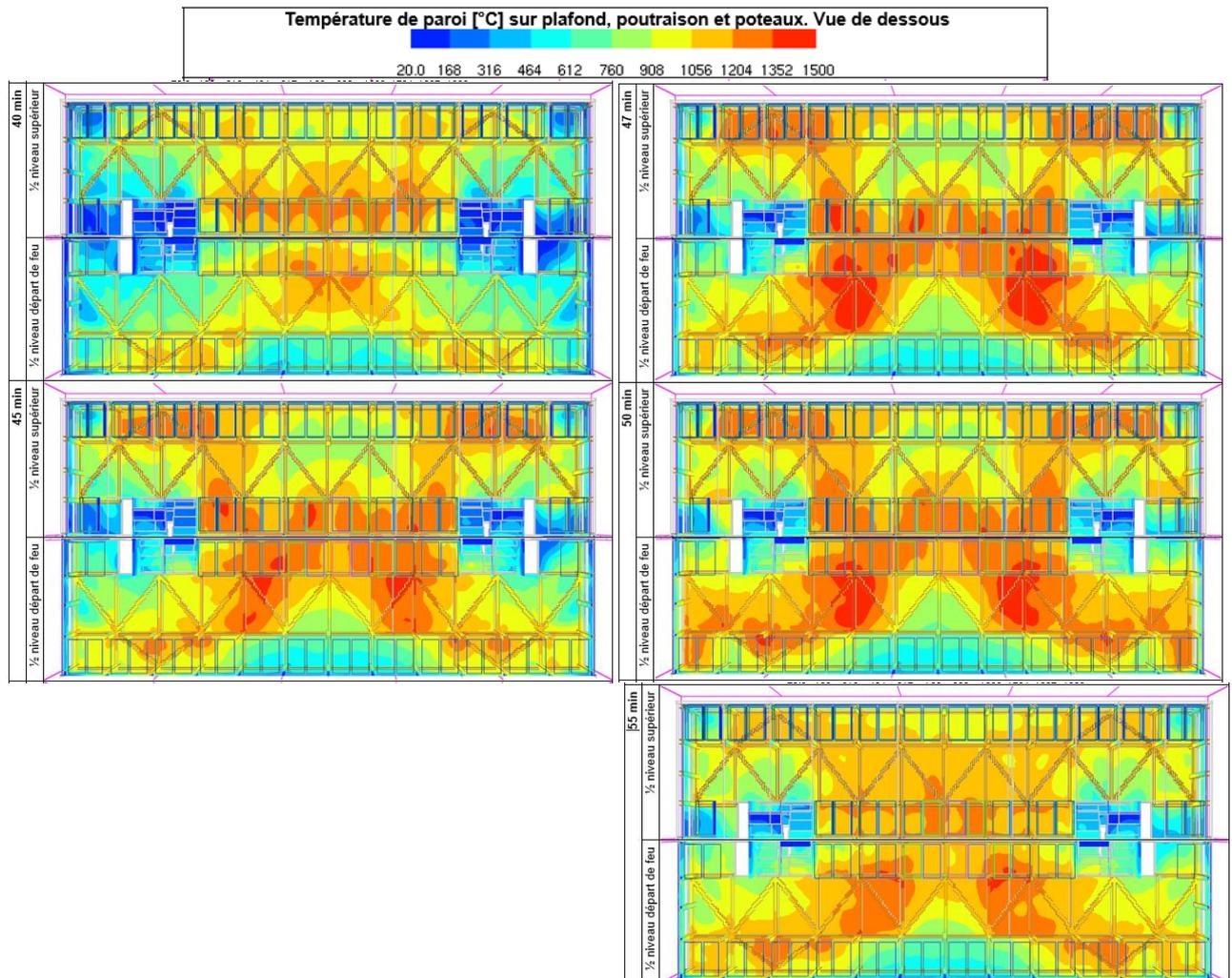


Figure 7-3 : Évolution de la température sur toutes les parois et toute la structure en bois

La figure ci-dessous détaille les éléments de structure les plus exposés (poutres et haut des poteaux), ainsi que les poteaux au milieu des façades (longitudinale Ouest ouverte, et latérale ouverte). Ces éléments sont ensuite étudiés de façon plus quantitative.

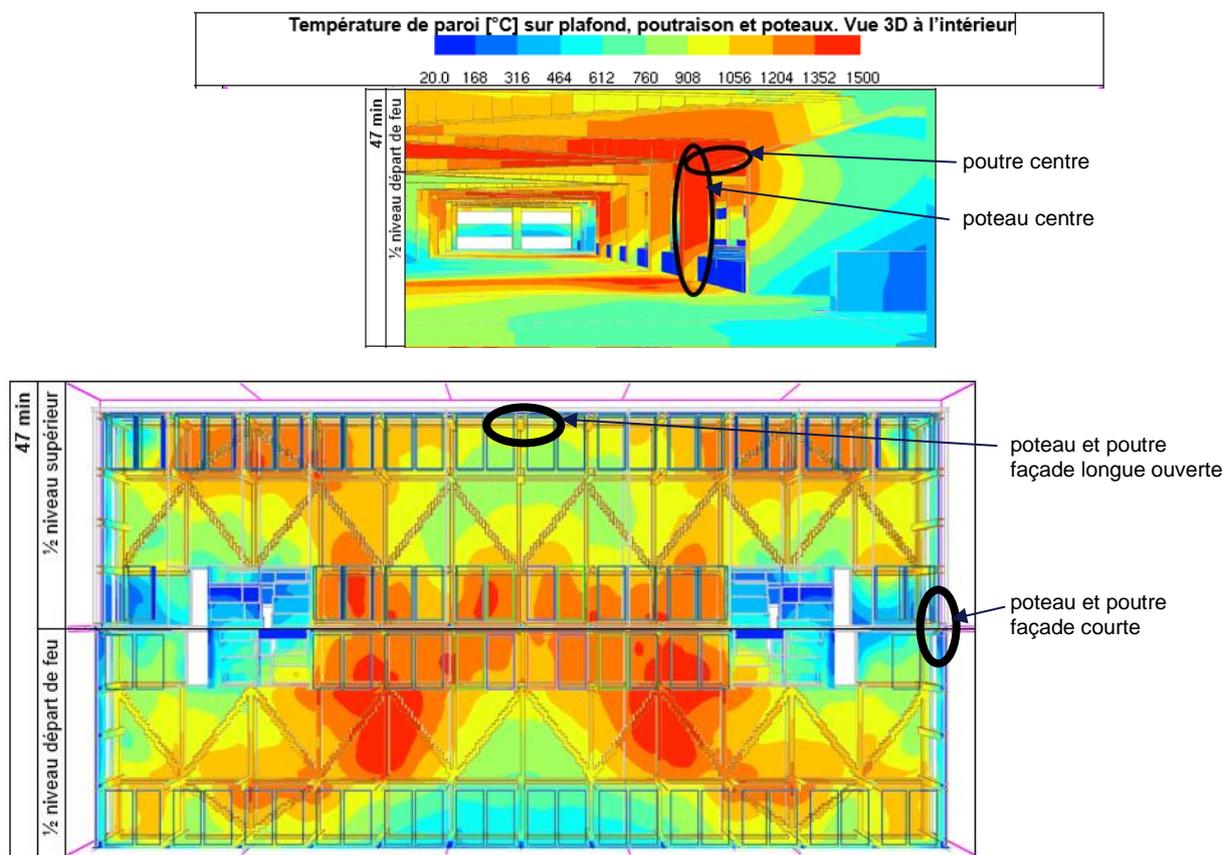


Figure 7-4 : Localisation des éléments de structure les plus exposés

L'évolution des températures sur ces éléments de structure est présentée sur la figure suivante. On constate que les éléments de structure les plus exposés montent à une température de paroi atteignant jusqu'à 1400°C sur un intervalle de temps très court.

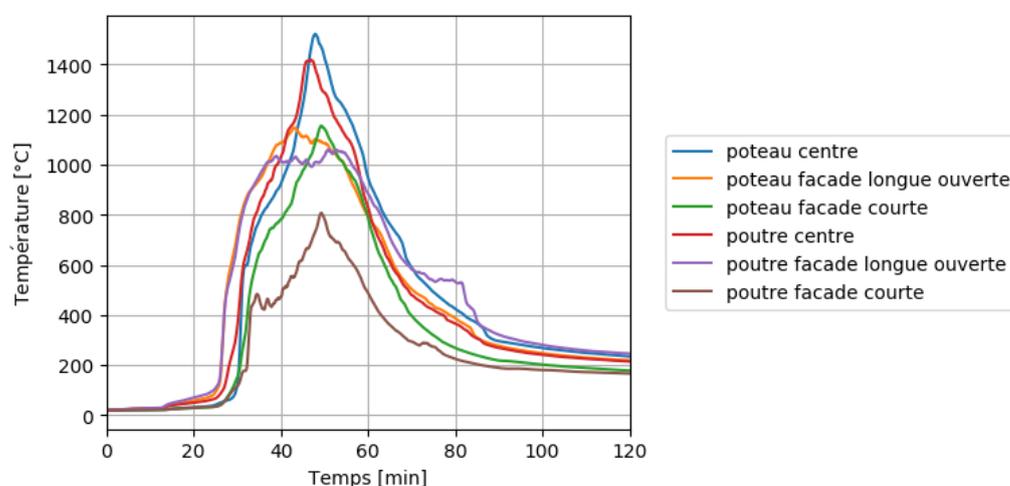


Figure 7-5 : Évolution de la température sur des éléments de la structure en bois

7.1.3. Combustion du bois

La vitesse de carbonisation du bois en profondeur des éléments les plus exposés ainsi que de ceux en bordure des façades (cf. Figure 7-4) est présentée sur la Figure 7-6. Globalement, et en raison des agressions thermiques importantes, les vitesses de carbonisation atteignent une valeur maximale de 2,38 mm/min, sur des durées allant de 20 à 25 minutes. Cette vitesse maximale est fonction du débit de pyrolyse maximal, de la densité du bois et du pourcentage de masse consommée.

Ces résultats montrent que seulement une partie du bois est consommée et que l'extinction des éléments en bois n'est pas due à l'épuisement du combustible.

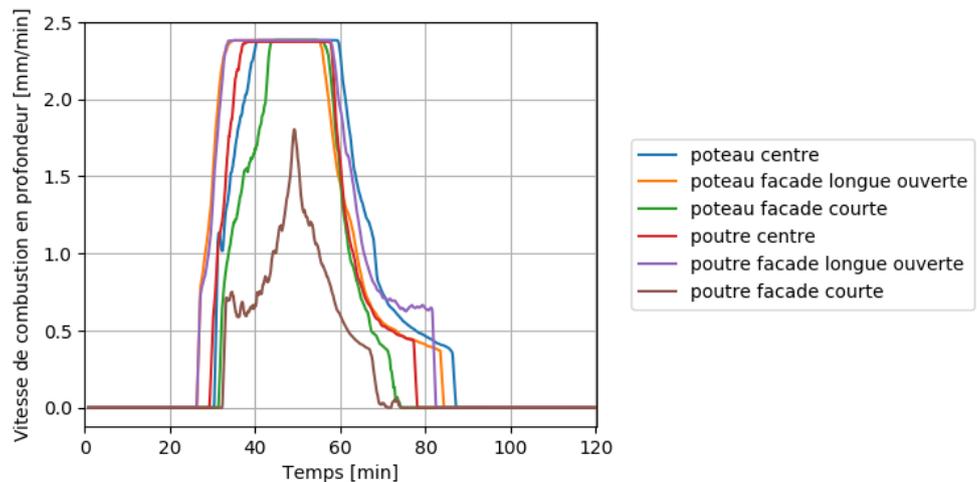


Figure 7-6 : Évolution de la vitesse de carbonisation d'éléments en bois

Remarque : la section obtenue à partir de ces courbes correspond à la section carbonisée et non pas à la section efficace au sens de l'Eurocode 5., Elle n'est donc pas utilisable directement pour le dimensionnement des éléments de structure.

7.1.4. Intervention des services de secours

La figure suivante présente l'évolution des conditions de température ambiante à 10, 20 et 30 minutes de feu, à 1 m et 2 m au-dessus du sol de chaque demi-niveau.

Au demi-niveau du départ de feu, et en-dehors du foyer de l'incendie :

- à 1 m du sol, la température commence à dépasser 100°C dans l'allée centrale vers 29 minutes et sur tout le niveau vers 33 minutes.
- à 2 m du sol, la température commence à dépasser 100°C dans l'allée centrale vers 13 minutes et sur tout le niveau vers 28 minutes.

Au demi-niveau supérieur, et en-dehors du foyer de l'incendie :

- à 1 m du sol, la température commence à dépasser 100°C dans l'allée centrale vers 26 minutes et sur tout le niveau vers 32 minutes.
- à 2 m du sol, la température commence à dépasser 100°C dans l'allée centrale vers 13 minutes et sur tout le niveau vers 26 minutes.

Pour ce scénario incendie, une intervention à 1 m du sol est donc faisable à une température inférieure à 100°C jusqu'à 26 minutes de feu. Pour des délais supérieurs, l'intervention des secours sera difficile voire impossible au niveau sinistré et ce bien avant l'effondrement de l'ouvrage.

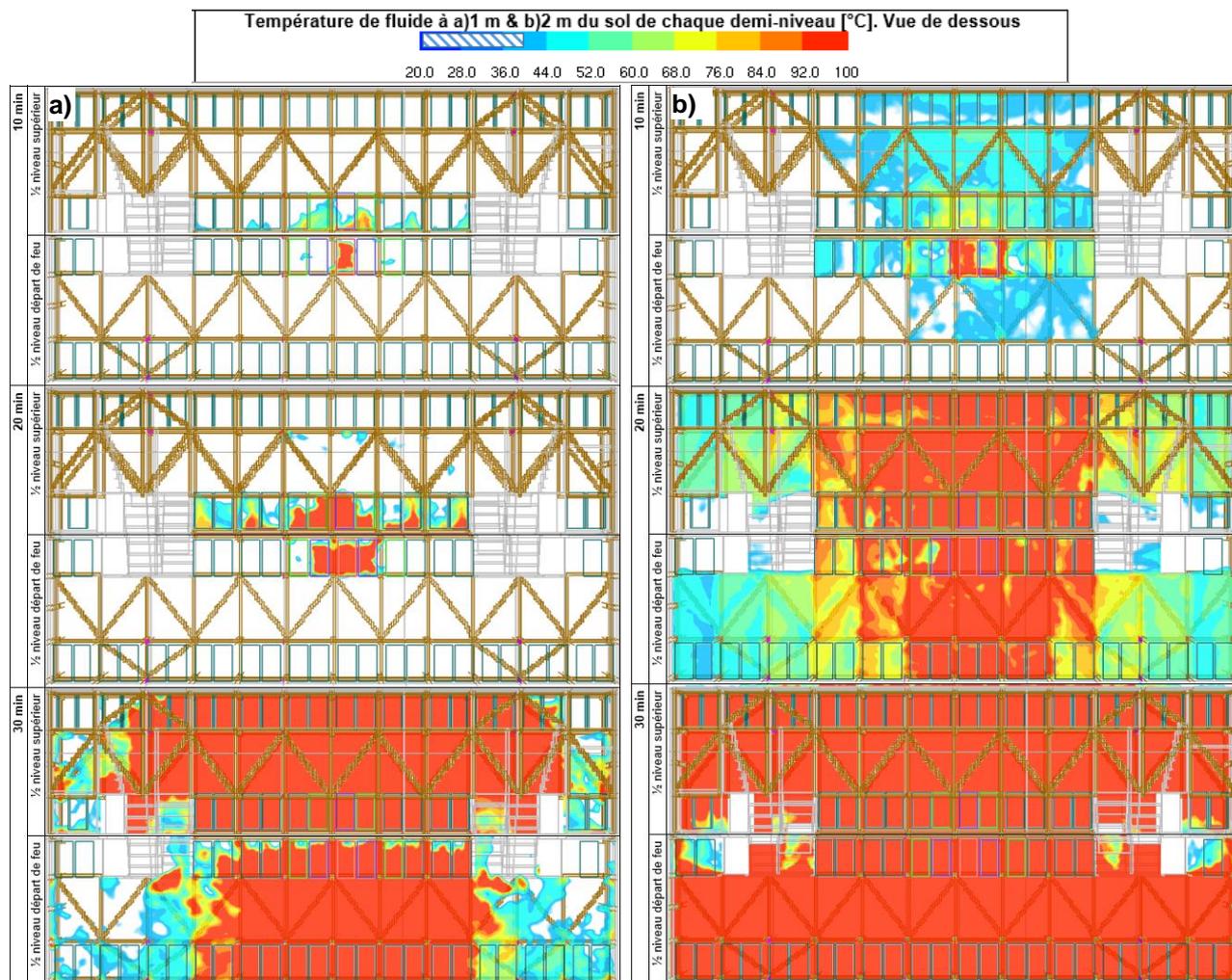


Figure 7-7 : Évolution des conditions de tenabilité en température à a) 1 m et b) 2 m du sol

7.2. SCENARIO 2

Comme pour le scénario 1, ce scénario simule un incendie généralisé des véhicules et de la structure en bois sur 2 demi-niveaux, mais en prenant le vent en compte. Les caractéristiques du vent sont indiquées au §5.3. L'objectif de ce scénario est de vérifier l'impact du vent sur le comportement du feu, plus précisément sur sa propagation de véhicule à véhicule, et sur sa propagation au bois de la structure.

7.2.1. Débit calorifique

La figure suivante montre l'évolution du débit calorifique total, ainsi que la part attribuable aux véhicules et celle attribuable aux éléments en bois de la structure.

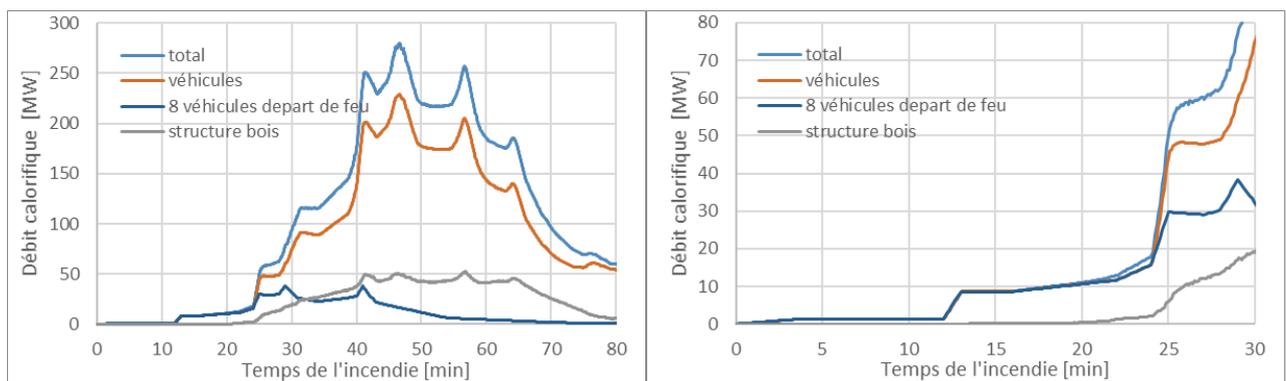


Figure 7-8 : Évolution des débits calorifiques (gauche : durée totale, droite : zoom sur le début)

L'évolution du débit calorifique de la totalité des combustibles suit celle des véhicules. On constate que les éléments en bois ne commencent à contribuer à l'incendie qu'à partir de 20 minutes, soit plus tard que pour le scénario sans vent (15 minutes). Cette contribution est limitée à 50 MW, et diminue jusqu'à s'éteindre lorsque la combustion des véhicules se termine.

Comme dans le scénario 1, c'est la combustion des véhicules qui induit celle des éléments en bois de la structure.

L'évolution du nombre de véhicules en feu en fonction du temps présenté sur la Figure 7-9 montre qu'après l'allumage piloté des 8 premiers véhicules, l'incendie se propage aux autres véhicules des 2 demi-niveaux de façon très progressive à partir de 24 minutes, par petits groupes de véhicules sur toute la durée de la simulation. Comme on peut le voir à l'annexe A.2, cela est dû au fait que la propagation de l'incendie est très fortement perturbée par le balayage naturel produit par le vent, notamment dans les voies de circulation de chaque demi-niveau.

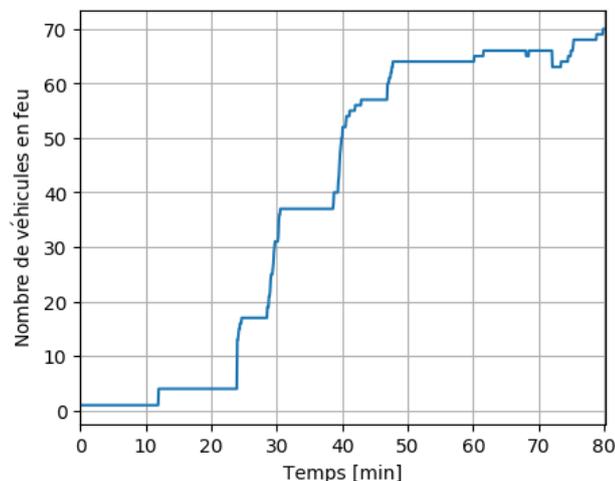


Figure 7-9 : Évolution du nombre de véhicules en feu

7.2.2. Sollicitations thermiques sur le bois

La figure suivante montre l'évolution de la température sur paroi induite par l'incendie sur le plafond et les éléments de structure en bois, en vue de dessous.

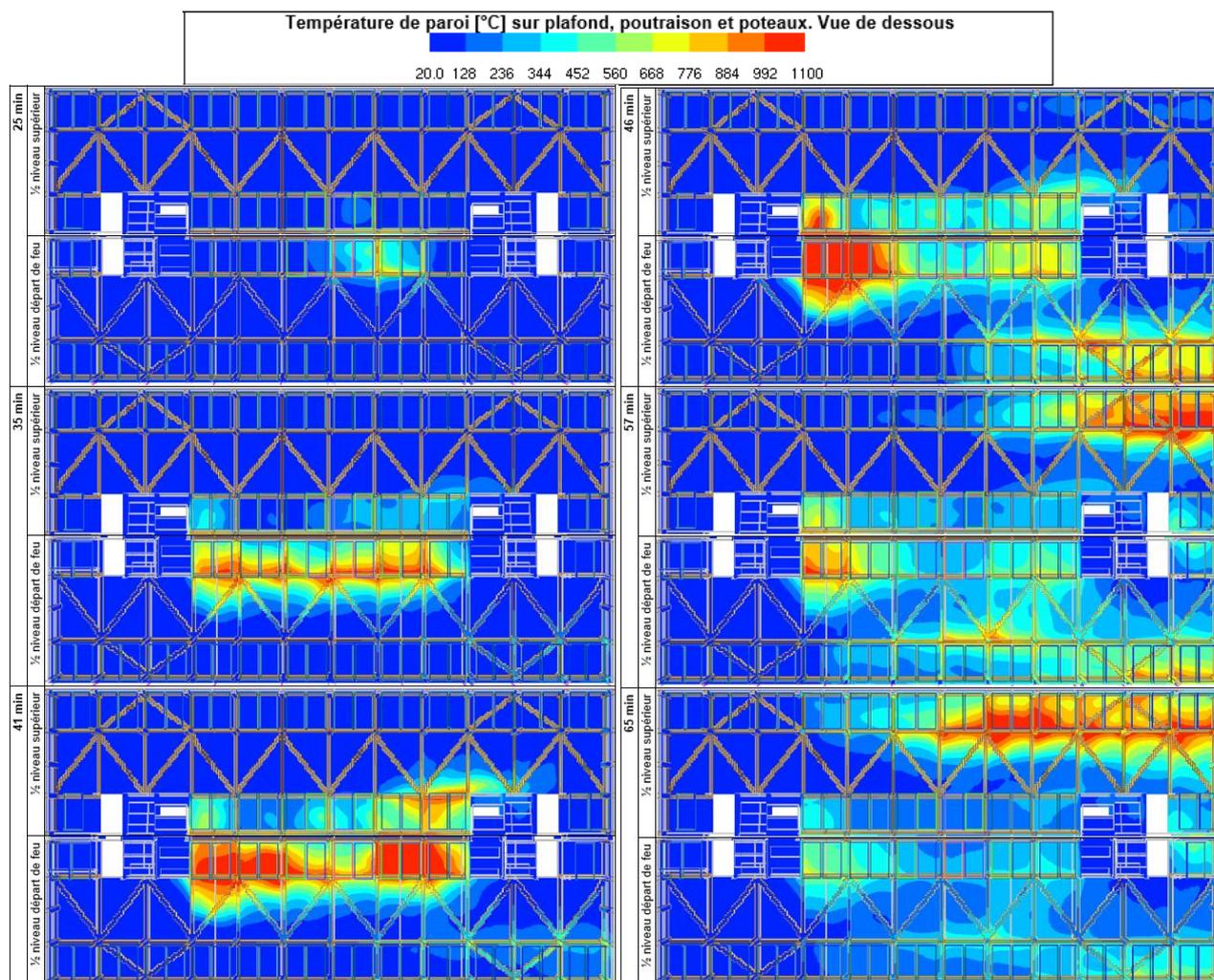


Figure 7-10 : Évolution de la température sur toutes les parois et toute la structure en bois

Les éléments de structure les plus exposés (poutres et haut des poteaux), ainsi que les poteaux au milieu des façades (longitudinale Ouest ouverte, et latérale ouverte) sont détaillés ci-dessous. Ces éléments sont ensuite étudiés de façon plus quantitative.

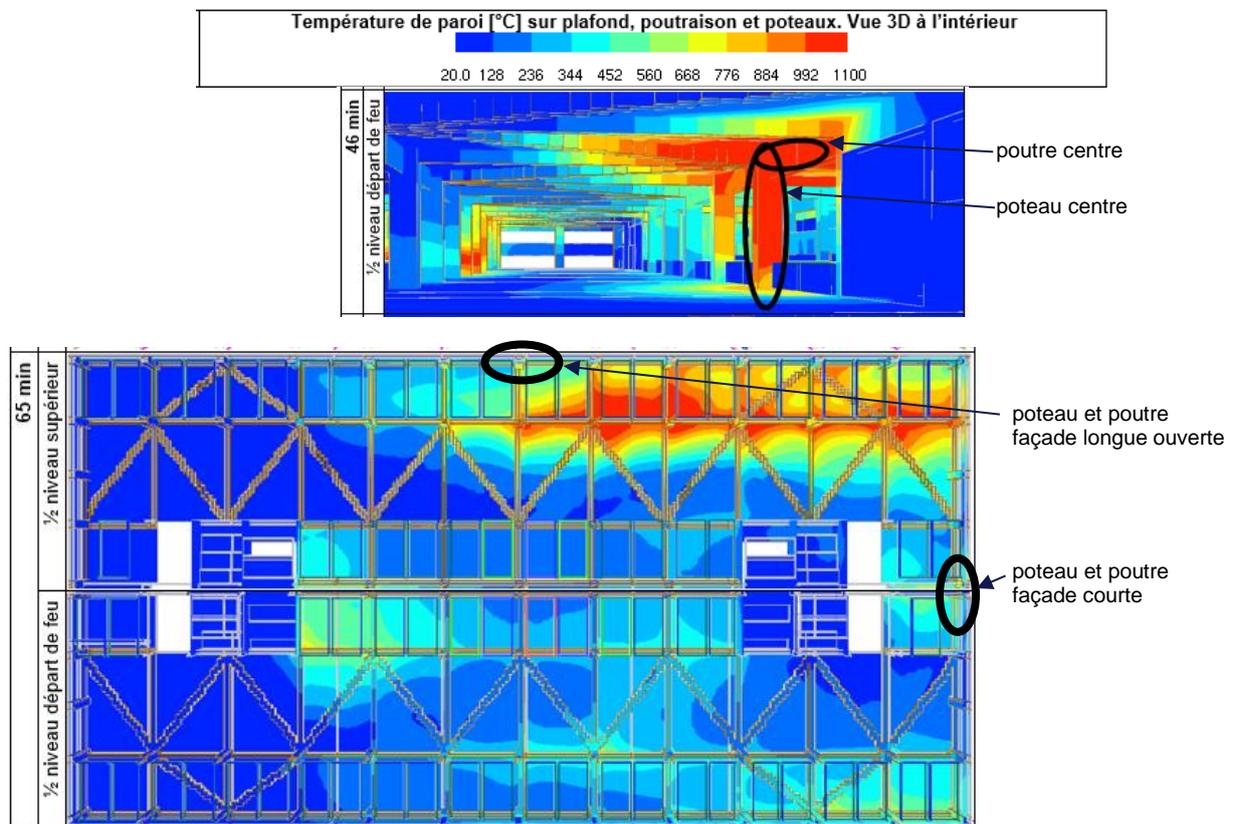


Figure 7-11 : Localisation des éléments de structure les plus exposés

La figure suivante montre l'évolution des températures sur ces éléments. On constate que les éléments de structure les plus exposés montent à une température de paroi pouvant atteindre 1300°C en pic.

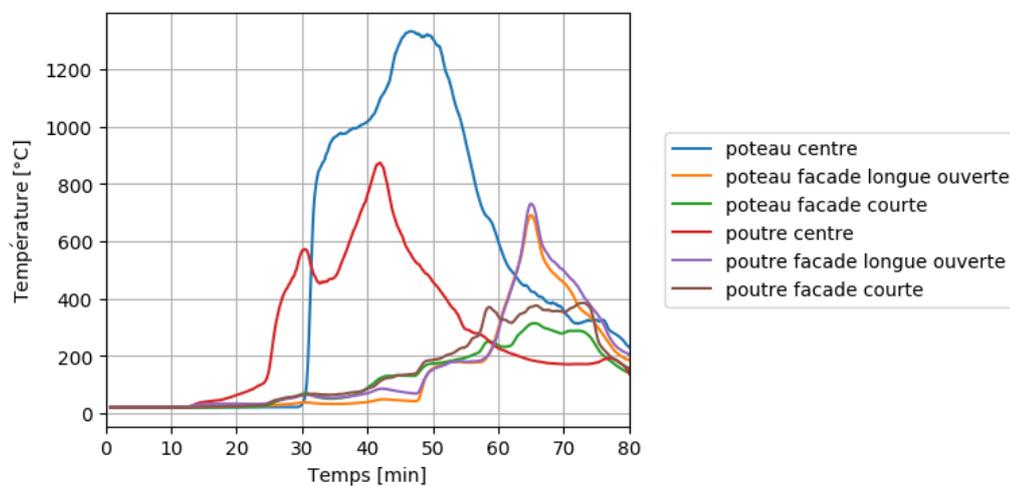


Figure 7-12 : Évolution de la température sur des éléments de la structure en bois

7.2.3. Combustion du bois

La vitesse de carbonisation du bois en profondeur des éléments les plus exposés ainsi que de ceux en bordure des façades est présentée sur la Figure 7-13. On constate que seule la première courbe correspondant au poteau le plus exposé atteint la vitesse maximale de 2,38 mm/min, sur une durée d'une vingtaine de minutes. Les autres éléments ne reçoivent pas un flux thermique suffisant pour l'atteindre.

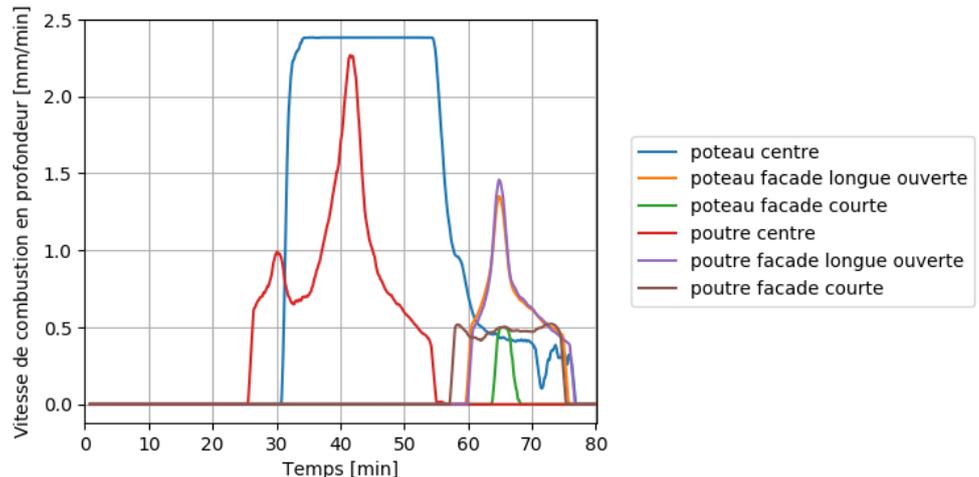


Figure 7-13 : Évolution de la vitesse de carbonisation d'éléments en bois

Remarque : la section obtenue à partir de ces courbes correspond à la section carbonisée et non pas à la section efficace au sens de l'Eurocode 5. Elle n'est donc pas utilisable directement pour le dimensionnement des éléments de structure.

7.3. SCENARIO 3

Ce scénario simule un incendie des véhicules circonscrit par le réseau d'extinction automatique à eau. La contribution du bois est prise en compte sans effet de l'eau.

Ce scénario a pour objectif de vérifier qu'en cas d'incendie localisé, il n'y a pas de généralisation de l'incendie à l'ensemble de la structure en bois et ainsi montrer que la contribution du bois est dépendante de la cinétique incendie des véhicules. Les conditions d'intervention ne sont pas analysées dans ce cas de feu contrôlé.

Remarque : L'effet de l'eau n'est pas pris en compte directement dans la simulation mais uniquement pour définir une nouvelle courbe de feu de véhicules.

7.3.1. Temps d'activation des sprinklers

Les têtes de sprinkler s'enclenchent progressivement selon le champ de température généré par le feu des véhicules. La 5^{ème} tête s'enclenche vers 11 min de feu, soit quand le feu est toujours cantonné au premier véhicule départ de feu. De façon sécuritaire, on considèrera les véhicules situés dans l'emprise des 5 têtes, à savoir 4 véhicules.

7.3.2. Débit calorifique

L'évolution du débit calorifique total, ainsi que la part attribuable aux véhicules et celle attribuable aux éléments en bois de la structure sont présentés sur la figure suivante.

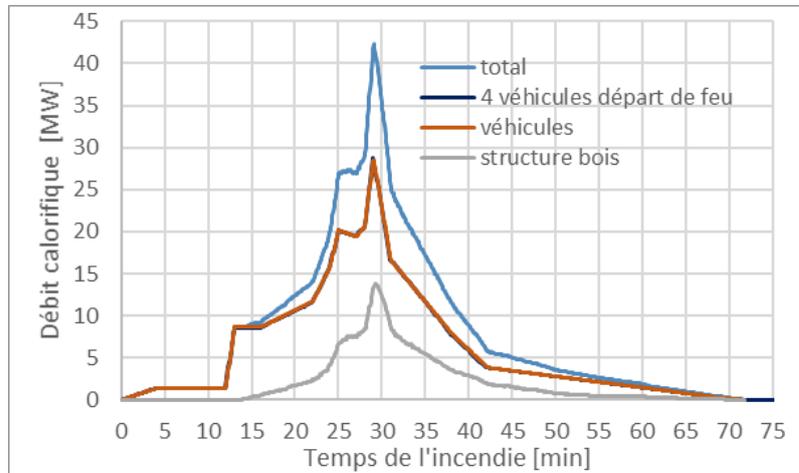


Figure 7-14 : Évolution des débits calorifiques

L'évolution du débit calorifique total suit celle des véhicules participant à l'incendie. Les éléments en bois commencent à contribuer à l'incendie à partir de quinze minutes, comme pour le scénario 1. Cette contribution reste localisée au-dessus des 4 véhicules. Elle suit l'évolution du débit calorifique des véhicules, et cesse au même moment que l'extinction des 4 véhicules à 72 minutes.

7.3.3. Sollicitations thermiques sur le bois

La figure suivante montre l'évolution de la température sur paroi induite par l'incendie sur le plafond et les éléments de structure en bois, en vue de dessous.

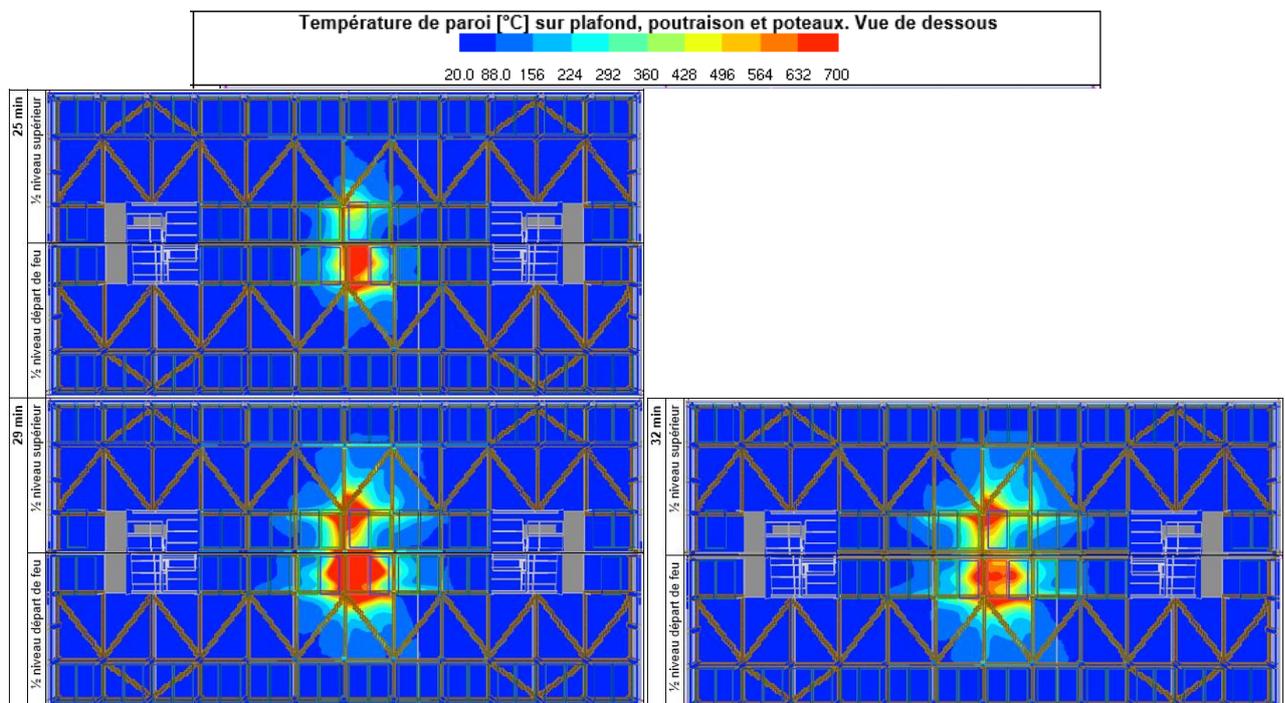


Figure 7-15 : Évolution de la température sur toutes les parois et toute la structure en bois

La figure ci-après détaille les éléments de structure les plus exposés (poutres et haut des poteaux), ainsi que les poteaux au milieu des façades (longitudinale Ouest ouverte, et latérale ouverte). Ces éléments sont ensuite étudiés de façon plus quantitative.

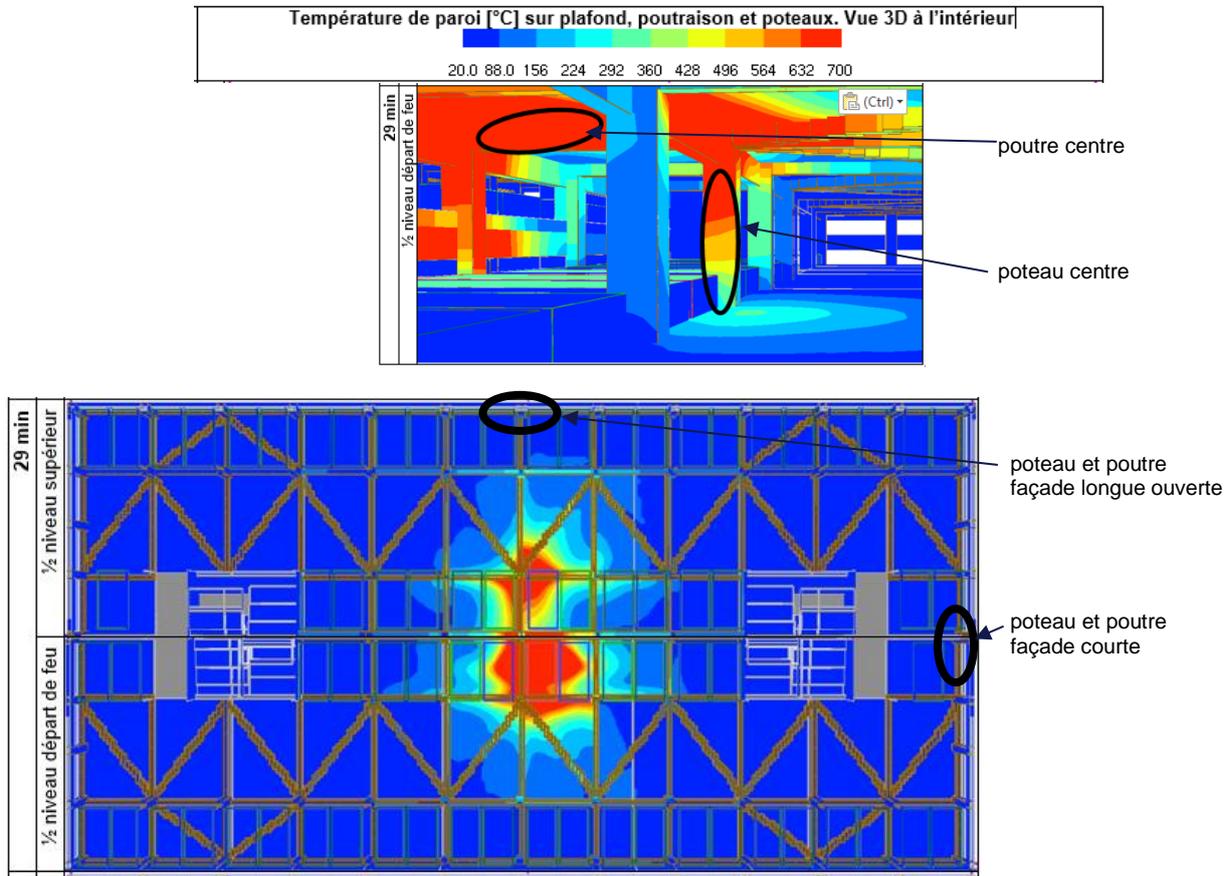


Figure 7-16 : Localisation des éléments de structure les plus exposés

L'évolution des températures sur ces éléments présentée sur la Figure 7-17 montre que les éléments de structure les plus exposés montent à une température avoisinant 900°C.

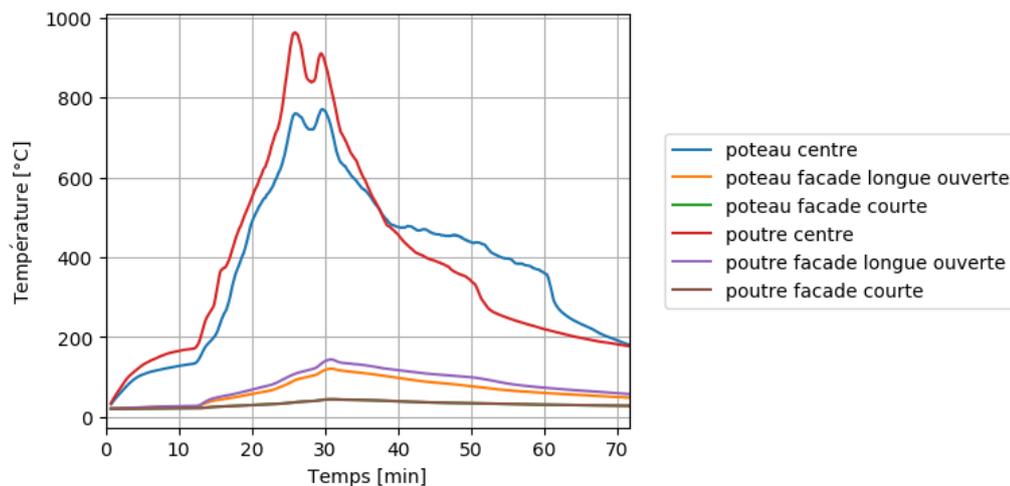


Figure 7-17 : Évolution de la température sur des éléments de la structure en bois

7.3.4. Combustion du bois

La figure suivante montre la vitesse de carbonisation du bois en profondeur des éléments les plus exposés ainsi que de ceux en bordure des façades. On constate que seuls les éléments adjacents au départ de feu brûlent et s'auto-éteignent avant de pouvoir atteindre la vitesse maximale de 2,38 mm/min.

L'échauffement de la structure est en effet plus faible que dans les incendies généralisés des scénarios 1 et 2, car moins de véhicules y participent et la contribution de la structure elle-même à son échauffement de proche en proche n'est pas assez significatif.

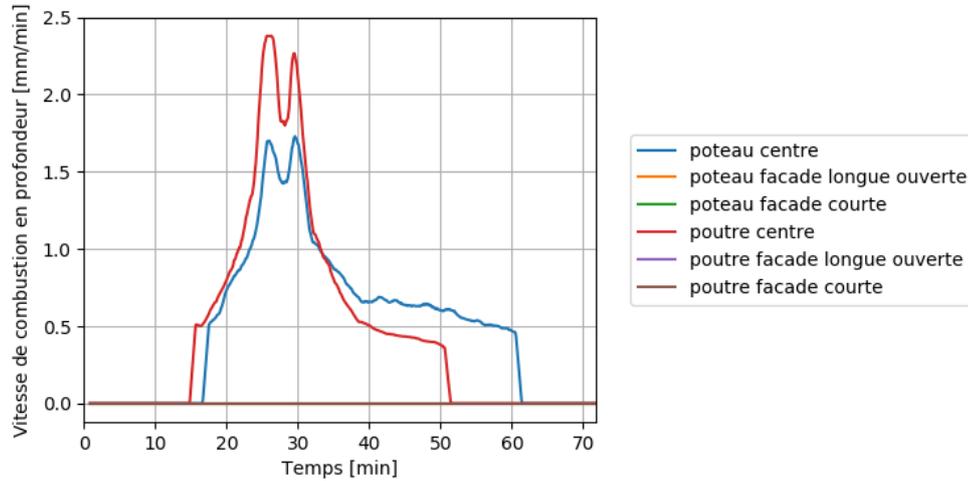


Figure 7-18 : Évolution de la vitesse de carbonisation d'éléments en bois

Remarque : la section obtenue à partir de ces courbes correspond à la section carbonisée et non pas à la section efficace au sens de l'Eurocode 5. Elle n'est donc pas utilisable directement pour le dimensionnement des éléments de structure.

7.4. SYNTHÈSE DES RESULTATS

Le tableau ci-dessous résume les principaux résultats de cette étude feu de façon comparative entre les différents scénarios étudiés :

	Scénario 1	Scénario 2 (Scénario 1 avec vent)	Scénario 3 (Avec sprinklage)
Propagation du feu de véhicule à véhicule	Très rapide, entre 24 et 33 min (Hypothèse de propagation de véhicule à véhicule sécuritaire (8 kW/m ²))	Ralentissement de la propagation aux véhicules	Feu circonscrit à 4 véhicules par le système de sprinklage
Actions thermiques sur le bois de structure	Très importantes. Température maximale en pic d'environ 1400°C	Légère diminution. Température en pic de 1300°C	Localisées et avoisinant 900°C
Contribution du bois de structure	Importante : jusqu'à 240 MW A partir de 15 min après départ de feu Généralisation à l'ensemble de la structure après 30 min. Auto-extinction de la combustion du bois après extinction du foyer primaire	Moindre : jusqu'à 50 MW (contribution du bois plus faible) A partir de 20 minutes mais pas de généralisation à l'ensemble de la structure.	Limitée : jusqu'à 14 MW (pas de généralisation à l'ensemble de la structure Auto-extinction de la combustion du bois après extinction du foyer primaire
Ampleur de l'incendie	Généralisation après propagation à l'ensemble des véhicules	Non généralisation (Le vent n'est pas un facteur aggravant dans le cas de ce parking)	Local (contrôlé par sprinklers)
Intervention des services de secours	Température à 1m du sol inférieur à 100°C pendant 26 minutes. Conditions d'intervention très difficiles après 26 minutes (généralisation de l'incendie)	Non détaillé car moins pénalisant que le scénario 1	Non détaillé car feu contrôlé

Tableau 7-1 : Synthèse de résultats

Note : la section obtenue à partir de ces courbes correspond à la section carbonisée et non pas à la section efficace au sens de l'Eurocode 5. Elle n'est donc pas utilisable directement pour le dimensionnement des éléments de structure .

Le bureau d'étude de calcul structure a vérifié le dimensionnement de la structure sur la base des résultats obtenus à partir des simulations numériques [3]. Il a notamment déterminé que le taux de travail des éléments de cette structure atteint 100% sous les feux réels entre 79 et 82 minutes après le départ de feu.

Les conditions de tenabilité pour l'intervention des services de secours sont maintenues pendant 26 minutes (cf. Tableau 7-1), soit quelques minutes avant la généralisation de l'incendie. Ce délai d'intervention est donc inférieur au délai de ruine du parc de stationnement. S'agissant d'un PSLV, on notera toutefois que l'intervention des services de secours reste possible depuis les façades extérieures à tout instant de l'incendie.

8. CONCLUSIONS

Cette étude d'ingénierie concerne un projet de parc de stationnement en superstructure dans le quartier Armagnac Sud de Bordeaux (33).

Le parc est organisé en demi-niveaux alternés en hauteur, et a la particularité d'être maintenu par une structure en bois, objet des attentions de l'étude.

Les différents demi-niveaux (sauf ceux du RdC à moitié en infrastructure et en superstructure) répondent aux exigences d'un PSLV, au sens de l'arrêté du 9 mai 2006. Trois des quatre façades sont donc en partie ouvertes et apportent de l'air tout en permettant un désenfumage réglementaire. La quatrième façade est complètement fermée et est adossée à deux immeubles d'habitation.

Cette étude s'inscrit dans le cadre d'une demande du SDIS 33, en complément de la demande de sprinklage.

Deux demi-niveaux en quinconce ont été entièrement modélisés, représentatifs de l'ensemble du parc. Différents scénarios enveloppes de départ de feu sur ces demi-niveaux ont été simulés. Les débits calorifiques de chaque véhicule, ainsi que les délais initiaux de propagation entre véhicules sont implémentés selon des résultats d'essais expérimentaux réalisés par CTICM/Efectis France. Un flux incident critique d'inflammation des véhicules est choisi de façon sécuritaire. Les conditions critiques d'inflammation et le débit calorifique du bois de la structure reflètent les données de la littérature les plus enveloppes possibles.

Les calculs et analyses ont mis en avant les résultats suivants :

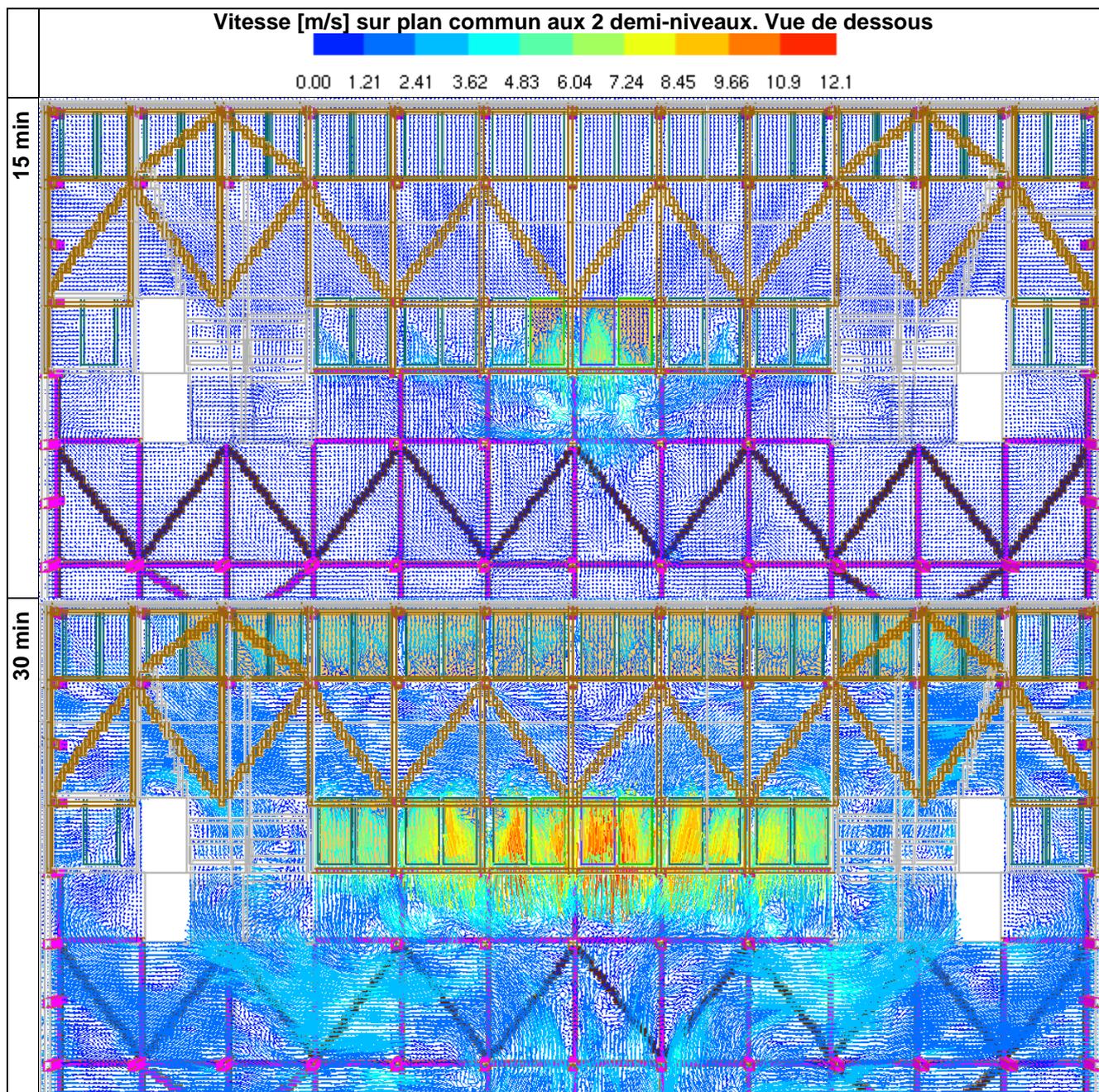
- En cas de dysfonctionnement du système d'extinction automatique à eau, malgré la généralisation à l'ensemble de la structure en bois, la combustion de la structure en bois ne s'auto-entretient pas au-delà de l'extinction du foyer primaire des véhicules (scénario 1).
- Du fait qu'il s'agit d'un PSLV, l'impact du vent n'est pas un facteur aggravant à la propagation de l'incendie, les courants d'air induits retardant la propagation du feu et empêchant la généralisation de l'incendie à la totalité du parking (scénario 2).
- En cas d'activation du système d'extinction automatique à eau permettant de cantonner le départ de feu aux seuls véhicules situés dans l'emprise de cinq têtes sprinkler (scénario 3), la structure en bois ne participe à l'incendie qu'au voisinage de ces véhicules, mais ne propage pas l'incendie à l'ensemble de la structure.
- Dans le cas d'un feu généralisé (scénario 1), les conditions d'intervention des services de secours restent acceptables jusqu'à 26 minutes après le début de l'incendie (températures inférieures à 100°C). Au-delà de 30 minutes, l'intervention au niveau sinistré devient impossible du fait de la généralisation de l'incendie.

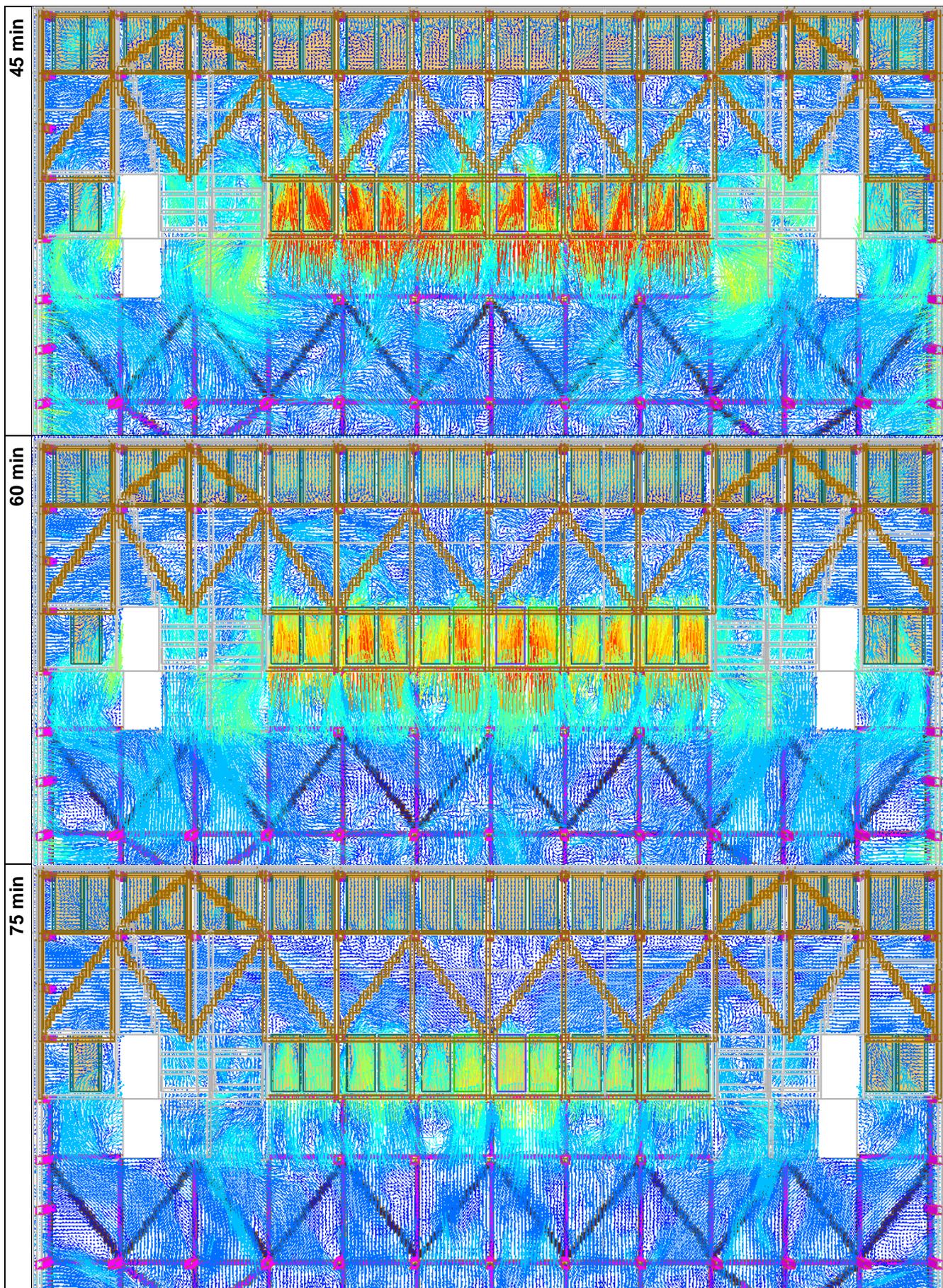
Les résultats de sollicitations thermiques en termes d'évolution de température de paroi et de vitesse de carbonisation des éléments en bois de la structure ont été fournis au client. Ce dernier a effectué une étude de stabilité au feu et estimé un délai de ruine aux environs de 80 minutes dans ces conditions. Ainsi, en cas de généralisation de l'incendie à l'ensemble d'un niveau, ce délai est supérieur au délai durant lequel les conditions d'intervention des secours à l'intérieur du parc de stationnement restent acceptables. Cependant, s'agissant d'un PSLV, on notera toutefois que l'intervention des services de secours reste possible depuis les façades extérieures à tout instant de l'incendie.

ANNEXE A : CHAMPS DE VITESSE

A.1 SCENARIO 1

La figure suivante montre l'évolution du champ des vecteurs vitesses, à une hauteur traversant les deux demi-niveaux, en vue de dessous. Ce cas sans vent permet de comparer avec les vitesses du cas avec vent du scénario 2. On constate que la vitesse augmente durant l'incendie à la jonction entre les 2 demi-niveaux en quiconque :





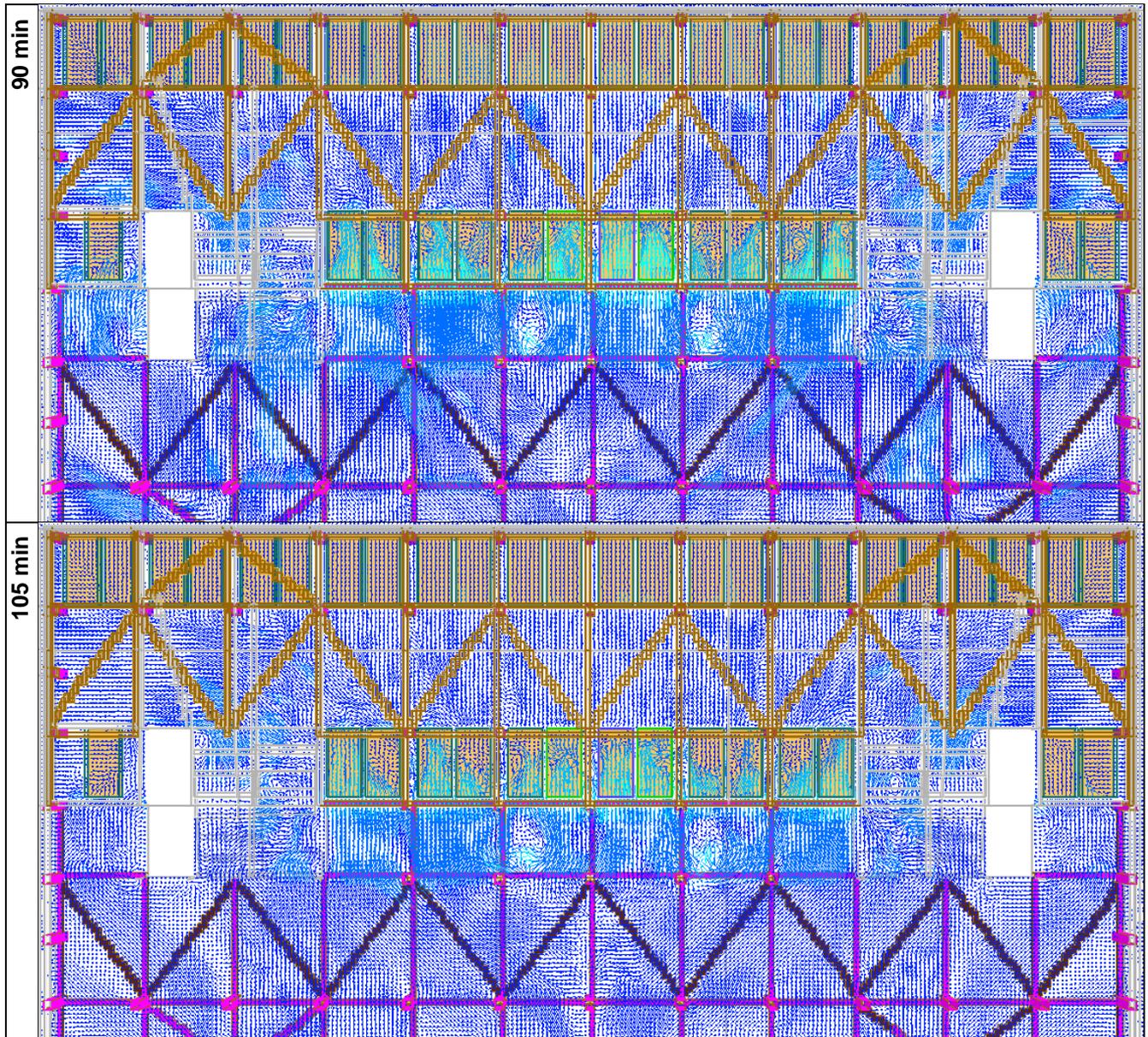
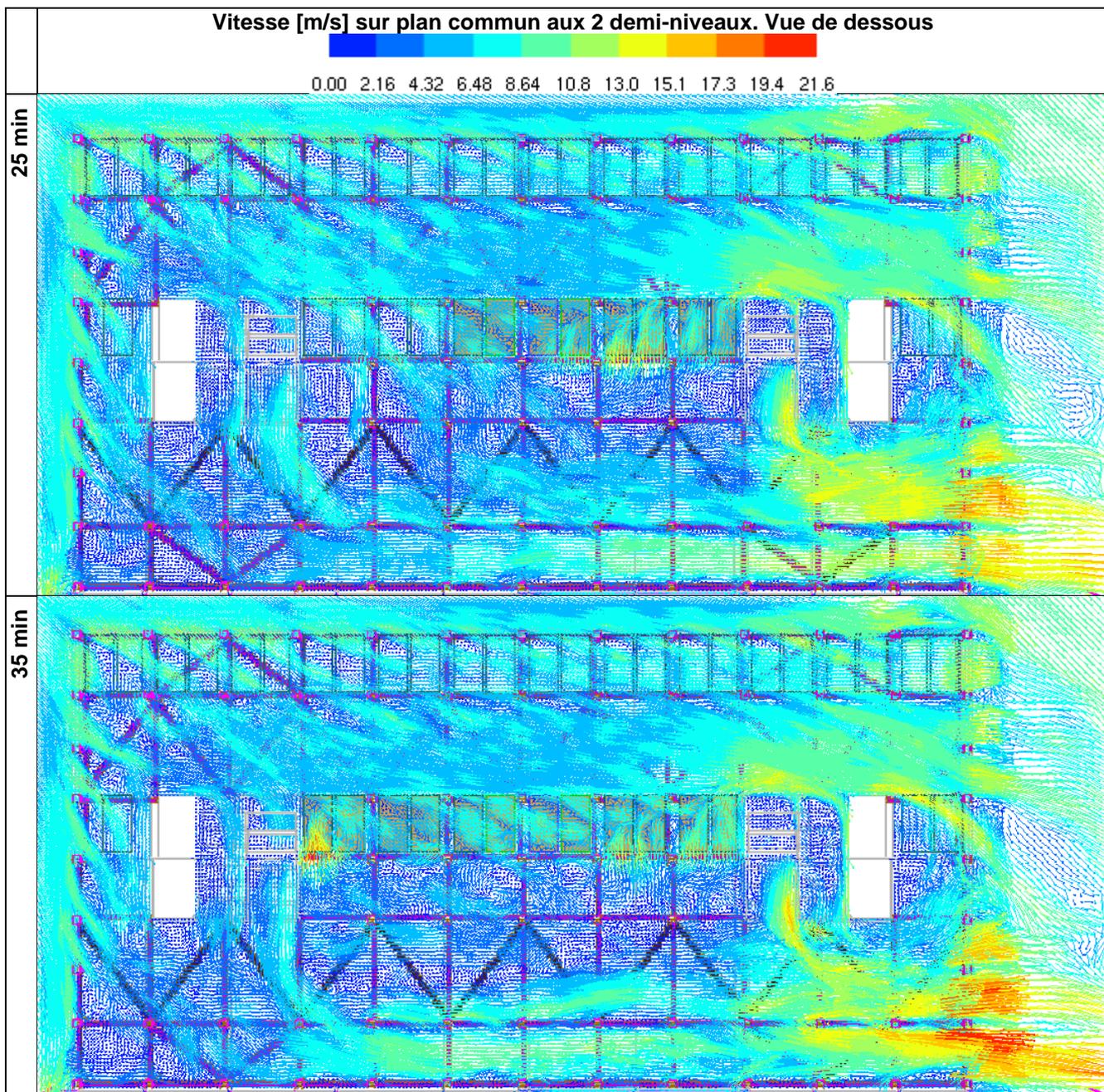
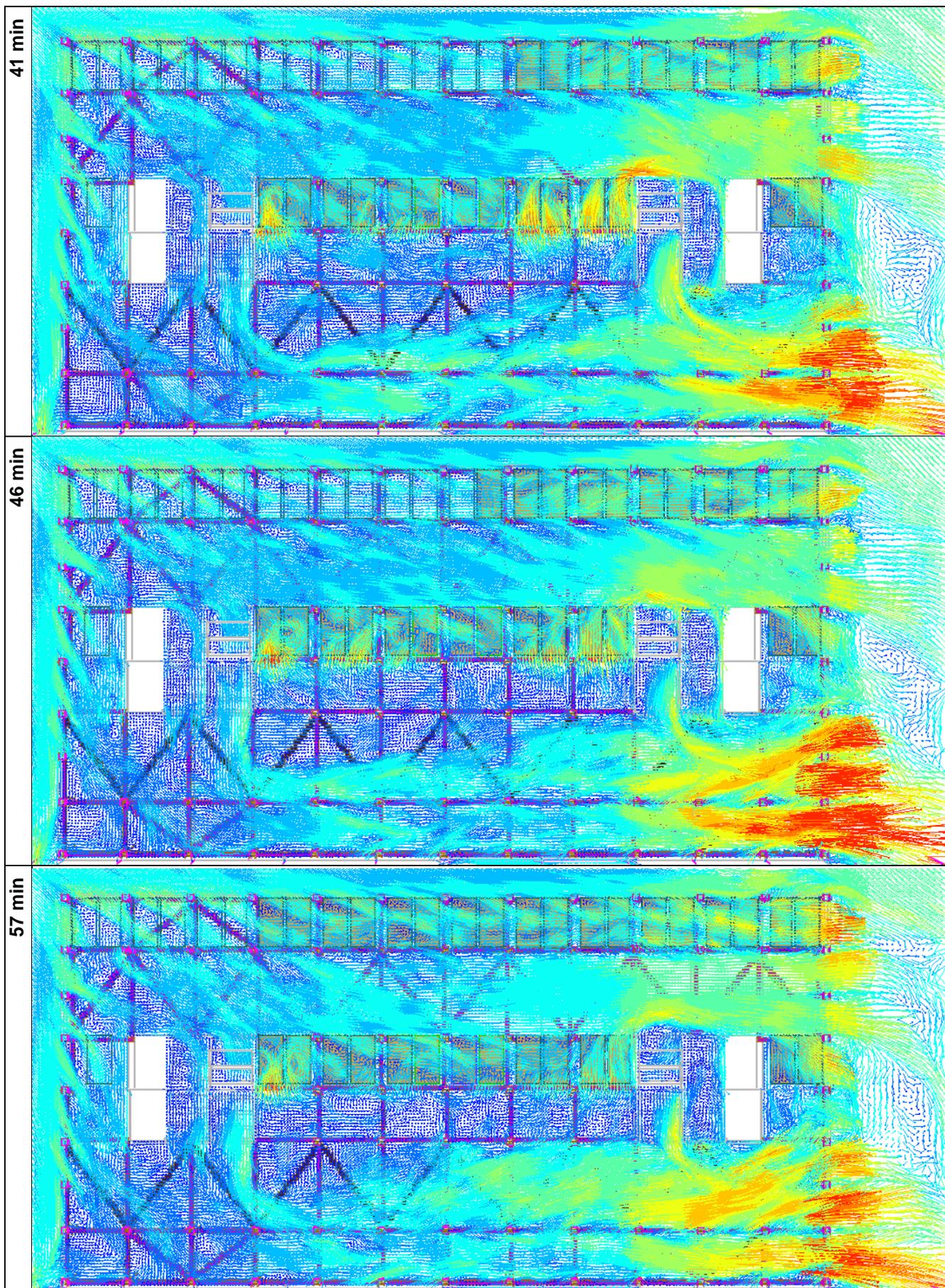


Figure A-1 : Champ des vecteurs vitesses à une hauteur traversant les 2 demi-niveaux

A.2 SCENARIO 2

La figure suivante montre l'évolution du champ des vecteurs vitesses, à une hauteur traversant les deux demi-niveaux, en vue de dessous. La direction incidente du vent dans ce cas provient de l'angle en haut à gauche sur cette figure. Les courants d'air dans chaque allée retardent la propagation du feu allumé sur les rangées centrales vers les rangées côté façades longitudinales :





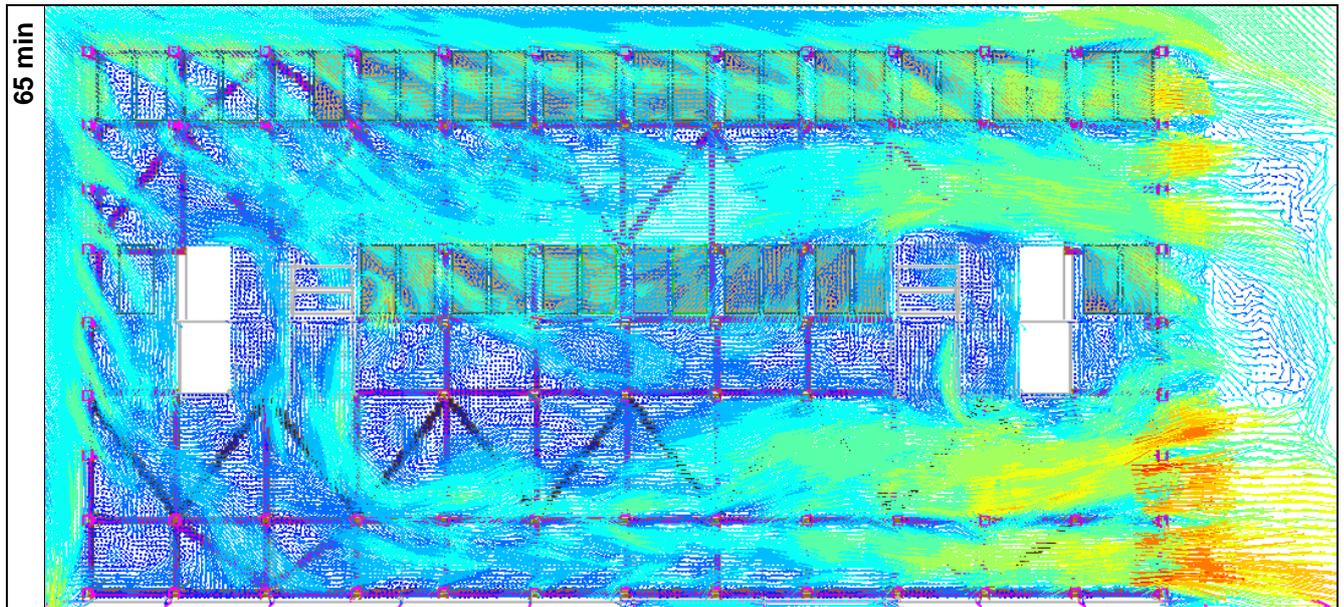


Figure A-2 : Champ des vecteurs vitesses à une hauteur traversant les 2 demi-niveaux